风险、跨期和空间决策的决策策略共享：眼动和主观判断的证据[1]

黄元娜[1,2] 江程铭[3] 刘洪志[4] 李纾[2,5*]

（[1]清华大学经济管理学院，北京，100084）
（[2]中国科学院大学心理学系，北京，100049）
（[3]浙江工业大学管理学院，杭州，310023）
（[4]南开大学周恩来政府管理学院社会心理学系，天津，300350）
（[5]浙江大学心理与行为科学系，杭州，310028）

摘　要　如何处理概率、时间、距离这类“虚构”信息以达成风险、跨期、空间决策或是人类在与其他物种竞争中胜出的独有能力。我们设计了两个研究探究人们是采用三种领域独特性的决策策略，还是统一采用一种连贯的、领域一般性的决策策略做出选择。研究 1 借助眼动追踪技术，在整体层面发现个体在三种决策领域（风险、跨期、空间）中均表现出主要基于维度的眼跳模式；在个体层面发现绝大多数参与者被划分为基于维度的决策者，且我们构建的维度间注视时长差值和维度间眼跳次数的差值可以显著预测选择结果的变化，为维度性的选择策略提供了支持性证据。研究 2 借助“直观模拟天平”发现，个体在三种领域中均通过齐当别理论所假设的“维度间差异比较”策略来达成选择。两个研究表明“以虚对实”（不同量纲比较）策略比“化虚为实”（加权求和）策略能更好地预测人们的选择结果，因此也更像是人们在三种不同决策领域中所使用的统一连贯策略。本研究的结果抑或能为今后三种决策领域的统一数学建模提供理论基础。

关键词 眼动追踪，直观模拟天平，虚实维度，维度间差异比较，不同量纲比较

分类号 B849:C91

1 引言

“人与动物的本质区别是什么？”这一世纪之问历来是个难题。研究者基于各自的领域专长提出了各种假说进行解答。从决策的角度出发，李纾（2016）提出贸易活动是人类文明进步的象征，抑或是人与动物的区别标志之一。迄今为止，人们已发现了涉足农业和畜牧业的其他物种（如能种植蘑菇、喂养蚜虫的蚂蚁），但尚未发现除人类以外的其他物种能进行完整的贸易活动。这或许是因为从事贸易活动需要统一处理货品或服务交换中可能存在的异地交货（空间决策）、延期交货（跨期决策）和无法交货（风险决策）等事宜，做出这三类决策就必须在大脑中表征出空间距离、延迟时间和概率这 3 种看不见、摸不着、抽象的虚构概念，而其他物种怕是不具备与人类一样的能统一生成并处理这 3 种虚构维度的能力。据此我们猜测，或许是因为学会了如何统一在距离、时间、概率等“虚构”维度

[1]收稿日期：2022-02-13
基金资助：国家自然科学基金项目（71471171, 71571164, 71901126），国家社会科学基金重大项目（19ZDA358），教育部人文社会科学青年基金项目（22YJC190009）
通信作者：李纾 lishu@psych.ac.cn

上表征选项，人类才能在与其他物种的竞争中胜出。

1.1 三种决策领域

风险、跨期和空间决策是三种典型且常被研究的决策领域，系统的决策研究始于风险决策、跨期决策并延伸至空间决策。“如何达成决策”一直是决策领域的关注重点，研究者逐渐发展出了不同的理论和模型对决策机制进行阐释。Payne 等人（1988）指出，决策模型或规则可以概括为**补偿性/选项性**或**非补偿性/维度性**两大种策略。补偿性/选项性规则通常假设决策者会考量所有备择信息，对每个维度赋予一个决策权重，将其加权求和后选择总价值或总效用最大的选项，该规则的核心是遵循效用最大化原则（Keeney & Raiffa, 1976; Olschewski & Rieskamp, 2020）；而非补偿性/维度性决策规则通常假设决策者仅聚焦于单个重要的决策维度，通过付出最小努力来快速评估选项（Gigerenzer & Goldstein, 1996; Tversky, 1972）。此外，也有研究发现个体的决策规则受到众多调节变量的影响，决策者会基于决策任务的不同采取不同的决策策略（Payne et al, 1993），例如个体倾向于在较困难的任务中采用基于维度的策略，在较简单的任务中采用基于选项的决策策略（Brandstätter & Gussmack, 2013; Pachur et al., 2013）。

风险决策（risky choice）是指对发生概率不同的结果做出判断和选择的决策过程（Birnbaum, 2018; Glöckner & Herbold, 2011; Kahneman & Tversky, 1979）。决策者并不知道哪种自然状态会发生，但知道这些自然状态的发生概率，它需要决策者在风险大的大收益和风险小的小收益之间做出权衡与取舍。对于如何达成风险决策，目前存在两大理论阵营：期望家族阵营和启发式阵营。期望家族模型假设个体在评估风险选项时是基于补偿性/选项性的期望价值，即选项的结果被概率所权重，继而选择数学期望值较大的选项，各维度中的缺陷和不足可以相互补偿，是一个基于审慎加权求和的过程（Payne & Braunstein, 1978），诸如期望价值理论、期望效用理论（von Neumann & Morgenstern, 1947）和预期理论（Kahneman & Tversky, 1979）均属于期望家族阵营。然而，有些研究者（Brandstätter et al., 2006; Li, 2016）假设风险决策的达成是遵循启发式或基于维度的决策策略，即忽略掉部分信息且不使用计算的方法，基于维度的决策模型包括可加性差异模型（Tversky, 1969）、随机差异模型（González-Vallejo, 2002）以及众多半序字典启发式模型的变式（见 Zhou et al., 2018）。

跨期决策（intertemporal choice）是指对发生在未来不同时间点的结果做出判断和选择的决策过程，它需要决策者在眼前的小利益与未来的大利益之间做出权衡与取舍（Frederick et al, 2002; Loewenstein & Prelec, 1992; Read, 2004）。与风险决策类似，对于如何达成跨期决策，同样存在补偿性/选项性和非补偿性/维度性两个理论阵营。其中，使用最为广泛的模型是双曲折扣模型（hyperbolic discounting models）以及指数折扣模型（exponential discounting models），均属于补偿性/选项性理论阵营，该类理论假设决策者会考量每个结果的价值，延迟结果的价值以一定的比率进行折扣，并选择折扣值高的选项（Green et al., 1994）。决策模型也经历了从单参双曲折扣模型到双参双曲折扣模型（Green & Myerson, 2004; Mazur, 1987; Rachlin, 2006）的修正。然而，近期的大量研究结果证明（Cheng & Gonzalez-Vallejo, 2016; Dai & Busemeyer, 2014; Scholten et al., 2014; 刘洪志等, 2015），与基于选项的模型相比，基于维度的决策模型能更好地描述和预测个体的跨期选择。

空间决策（spatial choice）是指对发生在不同空间距离的结果做出判断和选择的过程

（Xue & Brown, 2003; 李纾, 2016）。空间决策领域中的主流理论依然是在补偿性/选项性理论框架之下，即遵循效用最大化原则（Sheppard, 1980）。补偿性/选项性理论框架假设个体会根据空间距离的远近，赋予每个结果一个效用等级，继而选择产生最大效用的地点（Pellegrini & Fotheringham, 2002）。值得关注的是，该类决策与风险和跨期决策类似，效用概念仍贯穿于尚在发展中的空间决策理论之中。目前有关空间决策的多数研究都是在特定的虚拟环境中进行的，例如寻路任务（Wiener et al., 2012）或者通过采用特定环境来检测规划人类空间道路中的神经基础（Viard et al., 2011）。Pellegrini 和 Fotheringham（2002）指出，在一些迁徙情景中，由于人们处理大量信息的局限性，个体可能会诉诸于简化的、启发式的决策规则，如根据某些维度（如空间位置）来选择一组备择方案，并只评估该组中的备选方案。

1.2 概率、时间和空间的认知表征与神经表征

三种决策领域中的决策模型不仅可以同时归为两大种策略，其决策领域中所分别包含的概率、时间和空间在认知和神经表征上也密不可分。

概率和时间是可以相互转换的。例如风险决策中 100%的概率获得某一结果，对应到跨期决策中是此时此刻便可获得该结果。Fisher（1930）指出未来的结果总是会伴随着不确定性，而这种不确定性自然会对人们的时间偏好率或耐心程度产生影响，这说明概率和时间之间是相互影响不可分割的；Rachlin 等（2000）基于同一个双曲折扣方程可以同时解释时间折扣和概率折扣的实验证据，指出不确定的概率和延迟时间在实验中是等价的。Rotter（1954）首次提出风险决策和跨期决策之间具有类似性，发现个体以一种概率的方式对未来的延迟时间进行编码。上述证据启示我们，暗含了概率和时间的风险决策和跨期决策很可能具有共享的决策机制。

时间和空间是相互依存的。经典物理学提出任何客体空间的变化都伴随着时间的变化，时间和空间密不可分，从最基本的公式 S = VT（距离 = 时间*速度）也可窥见两者之间的依存关系。同时，时间和空间的一致性也被认为是认知系统的基本功能（Ulrich & Maienborn, 2010; Weger & Pratt, 2008）。May 和 Thrift（2001）甚至主张将时间（time）和空间（space）合并成时空（timespace）一词，以强调时空的相互依存性。实证证据表明，人们会倾向于用空间来理解时间（Boroditsky, 2000; Lakoff & Johnson, 1980; Ulrich & Maienborn, 2010; Weger & Pratt, 2008）。此外，在关于时空的研究中发现，时间和空间具有共享的神经基础（Bueti & Walsh, 2009），顶叶皮层很可能是这个共享的神经基础，因为有研究发现右顶叶皮层的损害同时破坏了时间和空间的知觉；Buzsáki 和 Llinás（2017）指出神经元对事件的一系列加工活动同时囊括了时间与空间信息的观点，也建议将时间和空间视为同一个心理结构。

同时，人们对时间的表征往往是建立在对空间的理解上。人们会利用空间范畴来表征时间概念，研究者采用不同的实验范式发现了空间-时间反应联合编码效应（Von Sobbe et al., 2019）；研究者也发现了基于时间词和基于时序的时间空间一致性关系，例如，较早的时间点与空间左侧相联，较晚的时间点与空间右侧相联（Ding et al., 2015）。这些结果说明时间和空间的一致性和不可分离性。何昕雨等（2020）综述了时间能够在三个不同的空间维度上分别进行表征的起源与激活机制。上述的一系列证据启示我们，暗含了时间和空间的跨期决策和空间决策很可能具有共享的决策机制。

通过上述分析可知，风险、跨期和空间决策分别包含了概率、时间和距离三种不同的属性，虽然是三种不同的属性，但从认知表征的角度发现三种属性相互依存、密不可分，

同时事件发生的概率、发生的时间、发生的地点等属性，会与结果一起影响到人们对结果效用的评价和对备择选项的选择（蒋多, 何贵兵, 2017）。以往有关三类决策策略的研究通常基于各自领域的属性进行独立的探索，分别发展出了期望家族和启发式家族两个决策阵营。然而，考虑到风险、跨期和空间决策在概念、决策规则等方面共享众多共通之处（陈海贤, 何贵兵, 2011; 周蕾等, 2019），其理论发展似乎在遵循相似的发展路径，即从基于复杂计算的理论模型到基于启发式的理论模型，这就启示我们三类决策很可能共享了统一的决策策略。

1.3 实维度与虚维度的划分

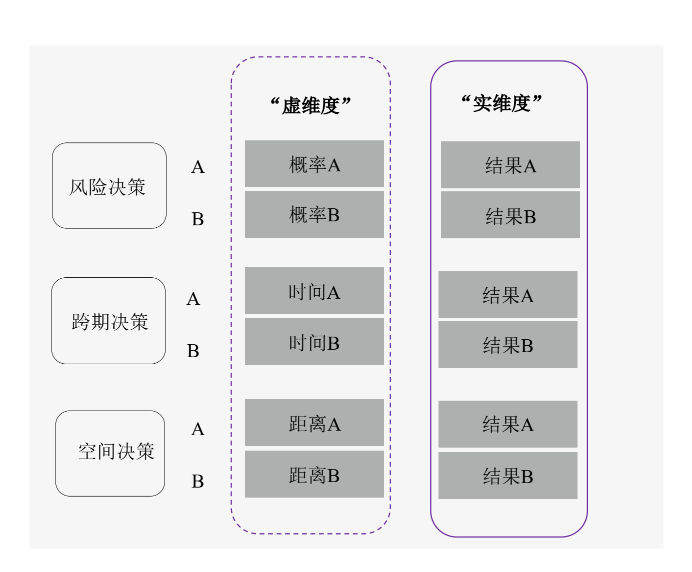


图 1 三类决策表征属性的维度示意图（注：A/B 表示两个备择选项）

仔细审视这三类决策及其它领域的决策（如多属性决策），我们发现三类决策有一独特共性，即可用"人为命名"（arbitrary naming practice）的**"实维度"**和**"虚维度"**来概括地表征三类决策中的选项（见图 1）。实维度对应的是结果维度（实线标注处），虚维度对应的是结果发生的概率、时间和距离维度（虚线标注处）。具体来讲，我们认为：被"实维度"表征的是有形的（tangible）、可视的（visible）、可触及的（touchable）事物；被"虚维度"表征的则是无形的（intangible）、不可视的（invisible）、不可触及的（untouchable）事物（同样的归类参见 Chiodo, 2017; Eikmeier et al., 2013; Kuang et al., 2022; Sarukkai, 2009）[2]。实维度和虚维度互相依存，没有"实结果"则无从选择"虚结果"。特别地，当"实结果"为获得时（gains）,决策者喜好的是与"获益结果"关联的"更**大**的概率"、"更**近**的时间"、"更**近**的距离"，然而，当"实结果"为损失时（losses）,决策者喜好的则是与"损失结果"关联的"更**小**的概率"、"更**远**的时间"、"更**远**的距离"。人们对"虚结果"的"趋与避"是依"实结果"的"得与失"而定的。相比之下，其它领域的决策（如多属性决策），就没有这种"虚实相依"的特性。如，对一盒巧克力的喜好，不会因为是"获得"还是"损失"巧克力而改变对其色、香、味等属性的"趋与避"。

对于最简单的二择一的风险决策（*smaller-but-safer, SS; larger-but-riskier, LR*）、跨期决策（*smaller-but-sooner, SS; larger-but-later, LL*）和空间决策（*nearer-but-smaller, NS; farther-*

---

[2] 对"虚实"维度的划分，可进一步参见 Li et al (2012) 对"a violation of permanence in information consumption"的讨论。

but-larger, FL），通过这种人为的命名方式，概率、时间和距离分别对应的结果维度（x_p; y_q; x_S; x_L; x_N; x_F）可以被看作实维度，概率（p_x; q_y）、时间（t_S; t_L）和距离维度（d_N; d_F）可以被看作虚维度。具体而言，要表征某个选项，实维度是结果维度（x_p; y_q 或 x_S; x_L 或 x_N; x_F），风险中的概率维度（p_x; q_y）、跨期中的时间维度（t_S; t_L）（Li, 2004, p.159）和空间中的距离维度（d_N; d_F）是虚维度。之所以"人为"地从三类决策中提取或统称所谓的实维度和虚维度，一是为了在描述人们在采用"基于维度"（dimension-based）的策略做选择时，更方便地"指代"三种不同领域（风险、时间、空间）的决策过程是"比较"了哪一个有"共性"的维度。二是为了在描述人们在采用"基于选项"（option-based）的策略做选择时，更方便地"指代"三种不同领域的决策过程是"整合"了哪两个有"共性"的维度。

依据虚实维度的概念，补偿性/选项性和非补偿性/维度性两大决策理论即可诠释为 2 类不同的处理虚实维度间比较的理论阵营。简言之，补偿性/选项性理论是**"化虚为实"**策略（translating intangible elements into tangible ones），非补偿性/维度性理论是**"以虚对实"**策略（pitting intangible element against tangible one）。补偿性/选项性理论假定个体会通过数学运算，将现有选项转换为相同量纲后进行比较。如，风险决策是根据概率大小将结果进行权重（weighted）后得到一个总结果；跨期决策是根据延迟时间将结果进行折扣（discounted）后得到一个总效用值；空间决策是根据距离远近将结果折扣后得到一个总效用值，最终两选项间比较的是转换后的总价值/效用大小（相同量纲）。这种将虚实维度进行数学运算，最终转换为**同一量纲**进行比较的法则，我们称之为"化虚为实"的运算法则，也就是传统补偿性/选项性决策理论所遵循的路径。

与之对应的是"以虚对实"比较法则。即，决策者无须经历复杂数学运算，可直接处理不同维度间的差异。这种法则假设，人们囿于认知资源的限制，不可能详尽处理所有信息，取而代之的是依赖简单启发式（Tversky, 1969），通过比较选项在维度间的差别达成选择。这种"以虚对实"的比较法则更为高效、自然和生态，是解释人类决策行为机制的另一路径。然而，"以虚对实"的比较法则在数学建模中遇到一个无法回避却又难以回答的问题，即维度间**不同量纲**的比较（如五公尺的差异与 5 公斤的差异），被认为是"不可能完成的任务"（mission impossible），尤其在物理世界中被认为不同量纲的比较是没有意义的，只有相同量纲的物理单位才能被比较、被齐同、相加或相减等。

1.4 两类决策策略的选择

围绕"补偿性/选项性"和"非补偿性/维度性"理论之争的研究众多。跨期决策领域中已有证据证明，"延迟时间差"（即虚维度差）和"结果差"（即实维度差）之间的相对大小可以解释和预测跨期决策中的选择结果。如，在对各类决策模型比较后发现，在模型拟合、模型预测等方面，基于维度的模型优于基于选项的模型（Cheng & González-Vallejo, 2016; Dai & Busemeyer, 2014）。再如，齐当别理论（equate-to-differentiate theory）（Li, 1994; 2004; 2005; 李纾, 2016）认为统领人类行为决策的机制不是某种期望值的最大化，而是对占优维度的探测，该理论将众多决策行为解释为是一个在选项的不同维度中进行差别判断的加工过程，即齐同掉较小的维度差别，只保留最大的维度差别作为最终决策依据。

近年来，对决策策略的研究已经从基于结果的方法拓展到基于过程的方法（魏子晗, 李兴珊, 2015）。在风险决策中，Brandstätter和Gussmack（2013）采用出声报告法（predict-aloud protocols）发现，人们对信息的加工方式发生在选项间而非选项内，这一

研究结果也得到了后续研究的支持（Brandstätter & Körner, 2014），说明人们的决策不依赖于审慎的加权求和计算过程。在跨期决策中，Reeck等（2017）通过网络版鼠标实验室法（MouselabWEB）发现人们的搜索策略在个体间存在差异，并通过*k*均值聚类方法将其分为比较型个体和整合型个体。刘洪志等人（2015）发现人们在跨期选择中采用的是非补偿性策略而非折扣策略，该结果支持了启发式系统的单维占优策略在跨期决策中起作用的假设。这些"过程"证据提示我们：风险决策和跨期决策不是一个加权求和算总分的过程。换句话说：结果没有被概率或延迟时间所权重或折扣，即没有进行"化虚为实"的处理。

随着认知神经科学技术的发展，研究者也开始采用脑功能成像技术探索决策策略的神经基础，例如在跨期决策中，Kable和Glimcher（2007）采用功能性磁共振成像（fMRI）技术，发现个体在表征价值的脑区（如腹侧纹状体，内侧前额叶皮层和后扣带皮层）整合了时间和金钱属性，为支持基于选项的跨期决策模型提供了神经层面的证据，Breiter等（2001）的研究也支持了基于选项的加工方式。然而，Van Duijvenvoorde 等（2016）有关风险决策脑机制的研究则发现，当选项提供了互相冲突的属性信息时，采用非补偿性策略进行决策的决策者会在属性冲突中表现出更大的背内侧前额叶激活，这也为基于维度的决策策略过程提供了神经层面的证据，并呼吁决策神经科学和神经经济学不仅需要关注补偿性决策策略，也应该扩大研究范围聚焦于非补偿性决策策略的神经机制。类似地，Rao等（2012; 2013）的研究分别从脑功能连接以及事件相关电位（ERP）技术角度探索了风险决策过程，支持了个体的风险决策过程遵循基于维度的决策策略的假设。随后有研究者从策略转换的角度出发探索决策者的决策策略，发现决策者并非采用一成不变的决策策略，在同一个体身上通常会观察到补偿性与非补偿性决策策略共存的现象，个体会根据相关信息自适应地选择决策策略（Gluth et al., 2014）。这些"混合"的证据中提示，从神经科学角度研究决策策略尚未得到一致性的结论。

1.5 影响决策策略选择的因素

人们运用何种策略达成决策一直没有定论，有些研究支持补偿性/选项性模型（Glockner & Herbold, 2011），而有些研究支持非补偿性/维度性模型（Brandstätter & Körner, 2014）。这些混合结果或许能引发我们思考一个至今未被充分研究（under-studied）的科学问题，即："决策者如何选择决策策略？"。已被充分研究（well-studied）的决策策略告诉我们，决策者"实际"或者"应该"如何在"给定"（given or offered）选项集中做选择（如，补偿性/选项性的策略指导我们用"选项间加权求和"的方法在选项集中做选择；非补偿性/维度性的策略指导我们用"维度间差异比较"的方法在选项集中做选择）。然而，至今没有一个满意的模型或理论告诉我们，为了在给定选项集中做选择，决策者如何在"非给定"（可自主生成种类和数量）"策略集"中选择一个策略，并利用这个策略达成风险、跨期或空间决策。

在尚无现成理论框架的指导下，我们猜测"任务难度"或是最直接影响决策策略选择的因素。首先，从理论推论上看，为借助补偿性/选项性策略达成选择，就必然受决策者"计算能力"或"任务难度"影响，决策者计算能力太低或任务难度太大，则无法通过算总分达成选择；而借助非补偿性/维度性策略达成选择，是借助维度间结果的比较大小，几乎不借助复杂的计算达成选择。其次，前人的研究结果也为"任务难度"的推测提供了支持性证据。计算难度已被发现与决策时间、注视时长和注视点数量相关（Schulte-Mecklenbeck et al., 2017; Su et al., 2013）。例如，张阳阳等（2018）发现，计算能力会影响加权求和任务中的选择，认知反思风格只影响自主跨期任务中的偏好选择，计算难度同样

会影响加权求和任务中的模型拟合度。Zhang 等（2022）在后续眼动实验中发现，在基线选择任务中，任务难度越高，反而观测到越多的基于维度的眼跳，这说明任务难度是影响决策策略的一个重要因素。同样，Pachur 等（2013）发现，在高难度任务中，人们倾向于采用基于维度的策略，在低难度任务中倾向于采用基于选项的策略。此外，Glöckner 和 Herbold（2011）以及周蕾等人（2019）的实验结果分别支持了补偿性/选项性模型和非补偿性/维度性模型，我们细究发现前者使用的备择选项为双结果[3]的选项，而后者采用的备择选项是单结果的选项，两者在“任务难度”上存在差异，这再次启示我们任务难度是影响决策策略的潜在变量。

1.6 关键科学问题的提出

以上综述可知，三类决策不仅在认知表征上密切相关，在决策策略研究中也经历了相似的理论发展脉络，即从以补偿性/选项性理论为基础的“化虚为实”运算法则，发展到以非补偿性/维度性理论为基础的“以虚对实”比较法则。虽然总体上三类决策的理论发展路径类似，但目前尚不清楚三类决策在决策策略上是否存在共通之处。因此，本研究试图解决的关键科学问题是：**三种虚构维度明显来自不同的决策领域，人们如何处理三种领域中虚维度和实维度之间的加工过程？是统一遵循“以虚对实”还是遵循“化虚为实”的决策策略？**

具体目标是考察：1）三类决策的达成是否遵循相同的决策策略，2）三类决策的达成是否以“维度间差异比较”的方式进行的。冀在探寻三类决策是否具有策略连贯解的过程中，为理解决策本质提供证据，并为风险、跨期和空间决策中基于维度的决策规则的理论构建（数学建模）工作提供科学依据。

研究 1 借助无侵扰的眼动追踪技术，试图提供三类决策是否均进行了维度内比较的证据；研究 2 借助直观模拟天平，试图从作用机制角度提供“三类决策的达成是否以维度间差异比较的方式进行”的证据。

2 研究 1 三类决策是否对选项间的虚实维度进行了维度内比较？来自眼动追踪的过程证据

本研究试图借助无侵扰的眼动追踪技术对三种决策领域的策略进行研究，通过寻找信息输入和结果输出之间的关系来解释决策行为背后的心理过程，该方法在验证决策理论方面也卓有成效，得到了众多研究的支持（Glöckner & Herbold, 2011; Pärnamets, et al, 2011）。研究 1 通过分析决策时的信息加工模式等指标来检验人们在三种领域中的决策策略是否均以“维度内比较”方式对选项间的实维度差异和选项间的虚维度差异进行了比较。基于上述三种决策已有模型的综述和概率、时间、空间在认知表征和神经表征上的相似性，本研究推测三类决策在过程指标和决策策略上存在诸多相似性，具体表现在：

H_1：在风险、跨期和空间决策领域中，反映决策过程的反应时指标、注视点平均注视时长指标之间不存在显著差异（即，对此进行的贝叶斯因子分析能提供中等及中等以上强

[3] Tversky（1969）的半序字典启发式（lexicographic semiorder）和 Li（2005）的齐当别均提不出如何在虚维度和实维度上比较“双结果”的选项的具体策略，这也侧面说明了双结果实验任务的难度之大。

度支持）；

*H*₂：风险、跨期和空间决策三种决策领域均采用基于维度的策略进行决策，即在反映决策信息搜索方向的 SM 值指标上均小于零。

鉴于任务计算难度对决策策略的潜在可能影响，本研究引入任务计算难度变量来帮助回答“三类决策是否对选项间的虚实维度进行了维度内比较”这一问题。

H_3：计算难度影响决策策略的选择。决策者倾向于在任务计算难度高时使用基于维度的策略（即反应时更短，更多基于维度的搜索），但在任务计算难度低时使用基于选项的策略（即反应时更长，更多基于选项的搜索）。

2.1 参与者

采用 G*Power 3.1（Faul et al., 2009）计算所需样本量，统计检验力 β = 0.80，效应量 Cohen’s f = 0.25（中等），统计方法为重复测量方差分析，计算所得样本量至少为 28 人，共招募 32 名北京市高校大学生（$N_{男性} = 10$，平均年龄 22.47 ± 3.03 周岁）。每位参与者可获得 20 元基础以及额外奖励，额外奖励根据参与者的真实选择决定，由参与者使用随机程序在风险决策任务中随机选取一个试次，将参与者在该试次上的实际选择所得数额的 0.1% 作为实验的额外报酬（约 3.0~9.5 元）。所有参与者均为右利手，视力或矫正视力正常，无神经系统疾病。本研究得到研究者所在机构伦理委员会批准。

2.2 实验仪器

采用 SR Research 公司生产的 Eyelink 1000 眼动仪，采样率为 1,000 Hz，单眼（右眼）采集。正式实验前，采用九点进行视线追踪系统的校正，在校正精度达到 Good 级水平后方能进行正式实验。实验刺激呈现于 19 英寸、分辨率为 1024 × 768 的 DELL 纯平显示器上。腮托位于距显示屏 60 厘米的位置，以减少头部晃动对眼动轨迹的影响。参与者双眼与屏幕边缘的水平视角为 28°，垂直视角为 21°，参与者通过键盘按键来完成反应。研究材料和数据已上传至数据共享平台 OSF（https://osf.io/t8742/?view_only=adee7739b7f944b3b6af28a54509cef6）。

2.3 实验设计

采用 3（决策领域：风险，跨期，空间）× 2（计算难度：高，低）被试内设计。

2.4 实验材料与流程

为构建决策题目，分别在风险、跨期和空间三种决策领域设置了两种计算难度的题目，计算难度通过设置金钱结果的大小来实现，一半题目为计算难度低的条件，选项结果由 6,000 元和 3,000 元组成；另一半题目为计算难度高的条件，选项结果由 9,500 元和 6,500 元组成，该设置方法的有效性已在文后的补充研究中得到验证。根据眼动实验的一般要求，在每个决策领域设计了 30 道二择一决策题目和 1 道质量筛查题，共 93 题。

任务流程见图 2。练习阶段，参与者需完成包含 6 个试次的练习程序。正式实验分为三个组块，每个组块代表一个决策领域，每个组块包含 31 个试次（包含一道质量筛查题），所有参与者在正式实验中共完成 93 道二择一选择题（质量控制题在后续分析中予以删除）。程序启动时，屏幕中心出现一个注视圆点，作为眼动的漂移校准，当通过漂移校准后，参与者需分别完成风险、跨期和空间决策任务。每道选择题包含了 AB 两个选项，选择选项 A，左手按“F”键，选择选项 B，右手按“J”键。作答没有时间限制，一旦参与者进行按键反应，屏幕会自动跳到下一个校准点并呈现下一个试次。组块之间以及每个组块内部的试次呈现顺序随机，每个组块间根据参与者的疲劳程度可作休息。

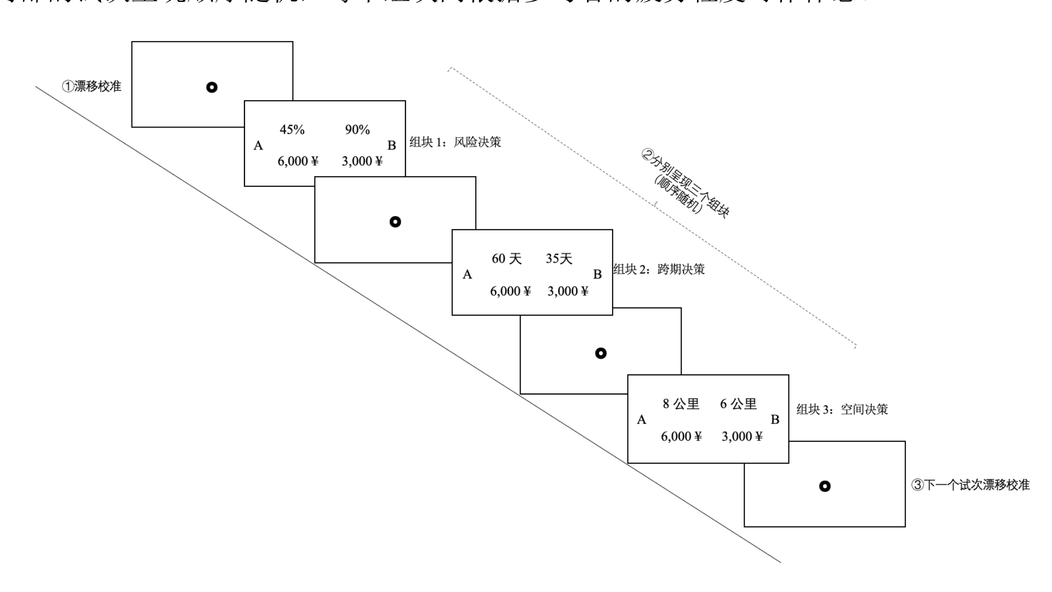


图 2 研究 1 实验流程

2.5 结果与分析

本研究共计 11,520 个试次，超过或低于平均决策时间 3 个标准差的试次被剔除（248 个试次，占比 2%），剩余 11,272 个试次用于正式分析。共采集到 39,706 个注视点，其中 837 个注视点的注视时长低于 50 ms 被删除，剩余 38,869 个注视点用于正式分析。

本研究使用 R 软件包以及 JASP[4]进行数据预处理和分析，同时考虑到本研究试图验证三类决策在眼动过程指标上不存在差异和虚无假设检验无法为接受零假设提供证据的客观存在，我们同时采用虚无假设检验和贝叶斯因子分析获得稳定证据。

2.5.1 基于整体层面的分析

选择结果

对选择结果进行描述性统计发现，风险决策中有 54%的参与者选择了 SS 的“保而小”选项，跨期决策中有 63%的参与者选择了“早而小”的 SS 选项，空间决策中有 51%的参与者选择了“近而小”的 NS 选项。从选择比例上看，三种领域在选择结果上存在对应关系，即，风险决策中的保守选项分别对应跨期决策中的 SS 和空间决策中的 NS，也就是说当个体更倾向于在风险决策中做出保守选项时，也更倾向于在跨期和空间决策中选择

[4]其中, 先验分布采用了 γ ≈0.707 柯西分布（Jeffreys, 1961），贝叶斯因子的解读参考自 Jeffreys (1961)推荐的标准。

延迟时间短和空间距离近的选项，这在一定程度上说明三类决策具有一致的选择模式，也能从决策选择中看出个体稳定的选择倾向。

反应时

为验证决策领域及计算难度在反应时上的差异，进行了 3（决策领域：风险 vs 跨期 vs 空间）× 2（计算难度：高 vs 低）重复测量方差分析（图 3a）。参考 Glockner 和 Herbold（2011）的方法，我们将反应时进行对数转换，结果发现决策领域的主效应不显著（$F(2, 62) = 0.97$，$p = 0.39$, $\eta^2 = 0.03$），决策领域与计算难度的交互作用不显著（$F(2, 62) = 1.02$，$p = 0.37$, $\eta^2 = 0.003$）。计算难度的主效应显著（$F(1, 31) = 4.39$, $p = 0.04$, $\eta^2 = 0.12$），事后比较发现，高难度任务的决策时间（$M = 2879.75$ ms，$SE = 95$ ms）显著快于低难度任务的反应时（$M = 2960.22$ ms, $SE = 99$ ms），该结果验证了 H_3，即高难度任务的反应时快于低难度任务反应时。我们推测，个体在低难度任务中有可能会采用补偿性/选项性的计算法则进行决策，而随着计算难度的增加，个体更可能会转而采用非补偿性/维度性的比较法则，从而导致高难度任务中的反应时快于低难度任务，这一研究推论也得到了前人研究的证据支持（Brandstätter & Gussmack, 2013; Pachur et al., 2013）。

此外，决策领域的主效应不显著，说明三类决策在反应时指标上具有一致性，贝叶斯因子分析发现，决策领域主效应的贝叶斯因子 $BF_{01} = 4.68$，中等强度的证据说明三种决策领域在反应时指标上具有一致性。

注视点平均注视时长

注视是指眼睛在对准某一目标物体并对其进行加工时的相对静止状态的持续时间（Kundel et al., 2007）。在注视过程中，所注视信息才会被大脑充分加工。注视点的平均注视时长，指的是在每个试次（trial）中注视点的平均注视时间。对注视点平均注视时长进行 3（决策领域：风险 vs 跨期 vs 空间）× 2（计算难度：高 vs 低）重复测量方差分析发现（图 3b），决策领域（$F(2, 62) = 0.88$, $p = 0.42$, $\eta^2 = 0.03$）、计算难度（$F(1, 31) = 0.002$, $p = 0.97$, $\eta^2 = 0.0001$）的主效应，及其交互作用均不显著（$F(2, 62) = 1.16$，$p = 0.33$, $\eta^2 = 0.01$），该结果从假设检验的角度说明三类决策在加工复杂度指标上不存在显著差异。贝叶斯分析发现 $BF_{01} = 4.71$，风险决策（$M = 257.88$ ms, $SE = 39.21$）、跨期决策（$M = 253.51$ ms, $SE = 33.70$）和空间决策（$M = 255.48$ ms, $SE = 35.34$）的平均注视时长之间无显著差异，“三种决策领域的注视点平均注视时长无差异”假设为真出现的可能性是“三种决策领域的注视点平均注视时长存在差异”为真出现可能性的 4.71 倍，中等强度的证据支持接受零假设，表明当前数据更加支持没有效应的零假设。

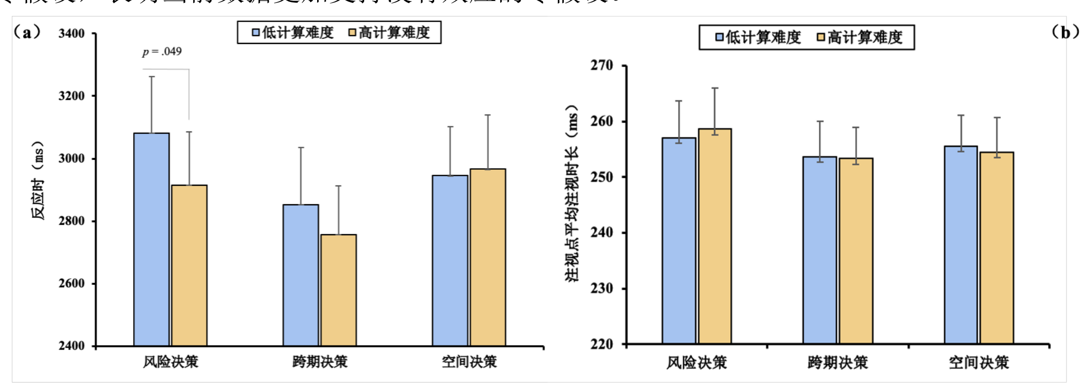


图 3 a). 三种决策领域中的反应时; b). 三种决策领域中的注视点平均注视时长

SM 值

SM 值（search measure）是刻画“维度内比较”或者“维度间比较”的重要眼动指标，通常被用来度量基于选项的眼跳和基于维度的眼跳的分布频数（Böckenholt & Hynan, 1994），进而判断决策者是否以“维度内比较”的方式对选项间的实维度差异（结果）或选项间的虚维度差异（概率/时间/距离）进行比较。简单来说，SM 值是观测到的基于选项眼跳次数与基于维度眼跳次数差值的函数，计算公式为：

$$SM = \frac{\sqrt{N}[\left(\frac{AD}{N}\right)(r_a - r_d) - (D - A)]}{\sqrt{A^2(D-1) + D^2(A-1)}}$$

A 和 D 分别代表选项和维度的数量，r_a 和 r_d 分别代表基于选项和基于维度的眼跳频数，N 表示眼跳的总频数。从计算公式中可以看出，SM 值越大（大于 0），表示基于选项的眼跳在频数分布上的优势程度越高，即越采用补偿性/选项性的“化虚为实”策略；SM 值越小（小于 0），表示采用非补偿性/维度性的“以虚对实”策略。

补偿性/选项性理论认为如果决策者遵循加权或折扣求和的“化虚为实”运算法则达成决策，应该在实维度和虚维度之间观测到更多的维度间（inter-dimensional）眼跳，即基于选项的眼跳频数应该多于基于维度的眼跳频数（图 4 左，蓝色箭头）。相应地，如果决策者遵循非补偿性/维度性理论所假设的“以虚对实”比较法则达成决策，应该在**实维度之内**与**虚维度之内**观测到更多的维度内（intra-dimensional）眼跳，即基于维度的眼跳频数应该多于基于选项的眼跳（图 4 右，橙色箭头）。

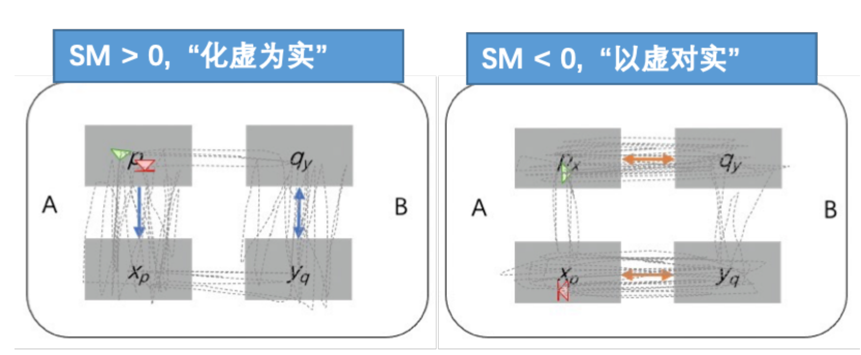


图 4 风险决策中基于选项（蓝色箭头）和基于维度（橙色箭头）的眼跳模式，每个格子代表备选项中的信息，箭头代表了扫视方向，其中 pq 表示概率，xy 表示概率对应的结果

首先，分别以 SM 值为因变量（$SM_{风险} = -0.43$、$SM_{跨期} = -0.55$ 和 $SM_{空间} = -0.81$），考察三种决策领域的 SM 值与 0 之间的差异，结果发现三种领域中的 SM 值与 0 差异显著（$t_{风险}(63) = 6.54, p < 0.001$, Cohen’s $d = -1.15$; $t_{跨期}(63) = 7.06, p < 0.001$, Cohen’s $d = -1.25$; $t_{空间}(63) = 9.51, p < 0.001$, Cohen’s $d = -1.68$）。SM 值均小于零，代表基于维度的眼跳频数多于基于选项的眼跳频数，说明参与者更多的是在实（虚）维度与实（虚）维度同一维度内，以“维度内比较”的方式对选项间的结果差异或者选项间的概率/时间/距离差异进行比较。

其次，决策领域的主效应显著（$F(2, 62) = 12.15, p < 0.001, \eta^2 = 0.28$），事后比较发现，风险与空间领域的 SM 值差异显著（$t(31) = 4.52, p < 0.001$, Cohen’s $d = 0.80$），跨期与空间领域的 SM 值差异显著（$t(31) = 3.44, p = 0.01$, Cohen’s $d = 0.61$）。这一结果启示我们，较之与其他两类决策，空间决策的策略更具有特殊性，值得深度挖掘。计算难度的主效应不显著（$F(1, 31) = 0.00, p = 1.00, \eta^2 = 0.00$），决策领域和计算难度的交互作用不显著（$F(2, 62) = 2.44, p = 0.10, \eta^2 = 0.07$）。三类决策领域在 SM 值上均为负值（图 5a），表明基于维度的眼跳频数多于基于选项的眼跳频数，说明决策者在三种决策领域中是以“维度内比较”的

方式处理选项间的虚实维度差异。

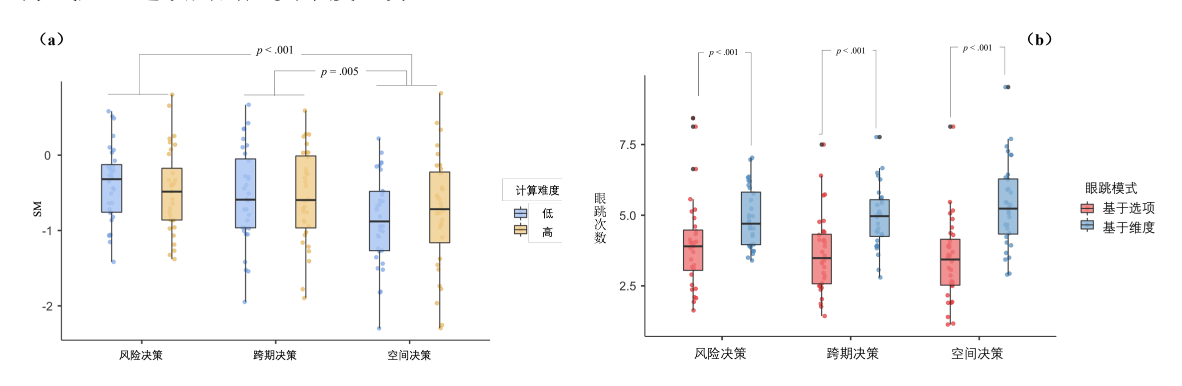


图 5丨左：三种决策领域的 SM 值；右：基于选项和基于维度的眼跳次数

研究 1 发现三种决策领域的 SM 值均小于零，说明个体更多遵循基于非补偿性/维度性的决策策略，分别对三种领域中基于选项和基于维度的眼跳数量进行更为直观的呈现，可以看到基于维度的眼跳数量（图 5b 蓝色箱体）要显著地多于基于选项的眼跳数量（图 5b 红色箱体）（*ps* < 0.001）。这为回答“决策者在三类决策中是否对选项间的虚实维度进行了维度内比较”提供了支持性证据。

此外，本研究以任务计算难度作为区分决策策略的额外影响因素，结果发现计算难度会影响参与者的反应时间，高难度任务的反应时快于低难度任务；计算难度虽然不影响个体总体上的决策策略，但是在风险（$SM_{高难度} = -0.49$ vs. $SM_{低难度} = -0.39$）和跨期（$SM_{高难度} = -0.55$ vs. $SM_{低难度} = -0.54$）决策中，高难度任务中表现出更基于非补偿性/维度性的决策策略，这一证据也侧面说明，人们的决策策略是一个权变的过程，易受某些潜在变量的影响。该结论与漂移-扩散模型（drift diffusion model, DDM）的假设有共通之处，即人类的决策是一个不断累积证据信息的过程，等达到证据阈值后便会做出决策（Ratcliff et al., 2016）。

2.5.2 基于个体层面的分析

SM 值区分个体决策策略

基于整体层面的发现，三种决策类型在决策过程指标上存在相似性，但基于整体的分析思路忽略了个体差异带来的影响。基于此，我们使用能够区分决策策略的 SM 值从个体层面解析每个参与者在三种决策类型下所采用的决策策略，同时根据参与者所使用的决策策略寻找相应指标来预测选择结果。从个体层面的 SM 值来看，风险决策中有 24/32 名参与者的 SM 值小于 0（$p < 0.001$）,8 名参与者的 SM 值大于 0（$p = 0.03$）（8、11、14、18、19、21、26、27 号参与者），跨期决策中有 26/32 名参与者的 SM 值小于 0（$p < 0.001$），6 名参与者的 SM 值大于 0（$p = 0.03$）（5、14、18、21、27、32 号），空间决策中有 28/32 名参与者 SM 值小于 0（$p < 0.001$），4 名参与者的 SM 值大于 0（$p = 0.03$）（8、18、21、27 号）。根据参与者的选择，我们将三种决策类型中，满足至少在两个类型中的 SM 值大于 0 的 5 名参与者（分别是 8/14/18/21/27 号）归为基于选项的决策者，其余 27 名参与者归为基于维度的决策者。这也从侧面说明参与者在三类决策上采用了相同的决策规则。

图 6 直观的展示了三种决策领域中每个参与者在每个试次上所采用的决策策略，其中横坐标代表试次（每个决策领域包含 30 个试次），纵坐标代表每个参与者（共 32 名），蓝色越深代表 SM 更小，更采用基于非补偿性/维度性的“以虚对实”策略，红色越深代表

SM 更大，更采用基于补偿性/选项性的“化虚为实”策略。总体上在三种决策领域中，蓝色多于红色，说明更可能采用基于补偿性/选项性的“化虚为实”策略。同时，空间决策中的蓝色区域明显多于跨期和风险决策，也说明较之其他两类决策，空间决策策略具有特殊性，值得进一步探索。

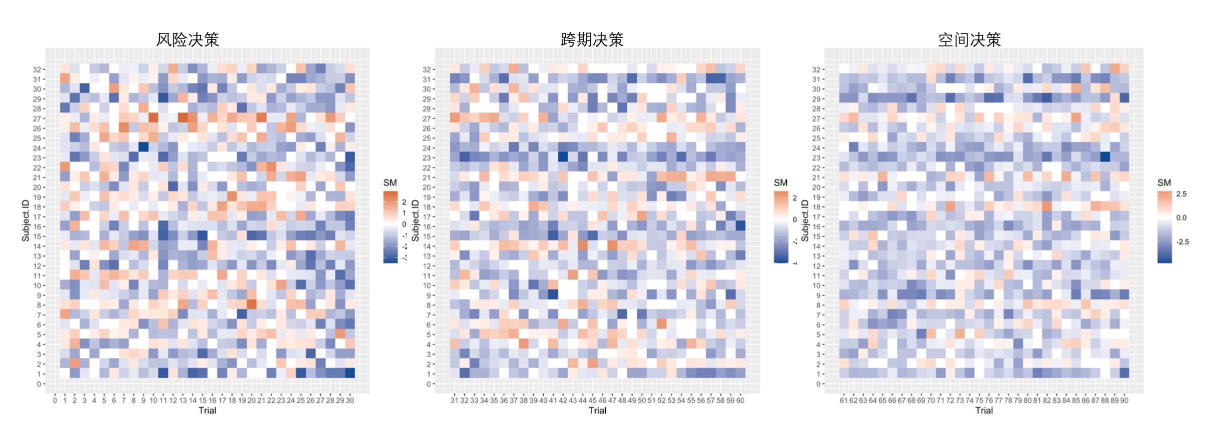


图 6 | 基于个体水平的 SM 值热力图，横坐标代表每个决策领域中的所有试次；纵坐标代表每个参与者的编号，蓝色代表 SM 值小于 0，红色代表 SM 值大于 0

眼动过程指标对选择结果的预测作用

在区分完每个决策者所使用的决策策略后，继而探索策略背后的解释机制，鉴于绝大多数参与者被分配到了基于维度的决策者，接下来将针对该类参与者进行深度分析，通过构建基于维度的眼动指标来考察这些眼动指标是否可以解释最终的选择结果，为采用基于维度的决策策略提供证据。

具体来说，我们构建了两个基于维度的眼动指标用来预测选择结果：维度间注视时长差值和维度间眼跳次数的差值。计算方法为：维度间注视时长差值 ＝ （虚维度上的总注视时长 — 实维度上的总注视时长）；维度间眼跳次数的差值 ＝ （虚维度之间的眼跳次数 — 实维度之间的眼跳次数）。分别以维度间注视时长的差值和维度间眼跳次数的差值为自变量，以选择结果为预测变量（将 AB 选项进行 01 编码），以参与者编号（id）和题目（item）为随机截距进行混合效应模型分析，结果发现维度间注视时长的差值可以预测选择结果（$B = 0.13$, $SE = 0.06$, $p = 0.03$）（图 7a），维度间注视时长的差值越大，表示虚维度更占优，因此会选择虚维度占有的 B 选项，这为基于维度的过程解释提供了依据。同时，维度间眼跳次数的差异也可以预测选择结果（$B = 0.22$, $SE = 0.06$, $p < 0.001$）（图 7b），维度间眼跳次数的差值越大，表示虚维度更占优，因此会选择虚维度占优的 B 选项，再次为基于维度的过程解释提供了证据。

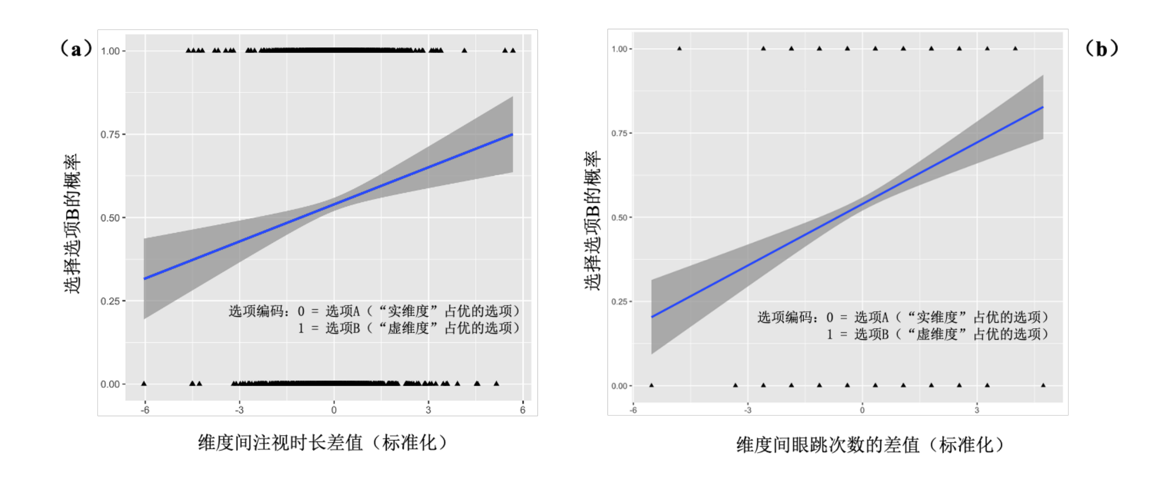


图 7丨a) 维度间注视时长对选择结果的预测作用； b)维度间眼跳次数对选择结果的预测作用

2.6 讨论

研究 1 发现决策者在三种决策领域中遵循了一致的基于维度的眼跳搜索模式，说明个体的决策过程更多是基于维度的比较过程。尤为值得一提的是，本研究发现空间决策中的 SM 值显著小于风险决策和跨期决策，说明相比于风险和跨期决策，个体在空间决策领域中更倾向于采用非补偿性/维度性的决策策略。我们不禁思考，作为人类最先发展和习得的空间感知能力，空间决策的决策策略特殊性值得我们进一步探索。

细心的读者可能注意到，研究中参数的呈现形式固定，即概率/时间/距离维度的数值在上，结果维度的数值在下，考虑到中国人的阅读习惯，会首先加工概率/时间/距离，然后再处理结果信息。但有研究发现呈现方式可能会影响决策过程（Basu & Savani, 2017），因此，改变呈现方式是否会影响决策过程值得后续研究的进一步验证。

在研究 1 中，三种决策领域中选项 A（B）的“实”维度上的参数是保持一致的，（例如结果均是¥60,00 或¥3,000），但并没有证据表明“虚”维度上的概率/时间/距离参数是否匹配。对此，有人会将这种证据理解为更加有力地支持“风险、跨期和空间决策的决策策略具有一致性”这一推论，因为即使“虚”维度的概率/时间/距离参数不等值（例如，45% ≠ 60 天 ≠ 8 公里）的情况下，我们依然得到了这一结论。但另一方面，也有人会质疑，除非有一个指标表明概率 P1（45%）和 P2（90%）之间的差异可以与时间 T1（60 天）和 T2（35 天）之间的差值相匹配（或等同于），可以与距离 D1（8 公里）和 D2（6 公里）之间的差值相匹配，否则无法得出“风险、跨期和空间决策具有一致的决策策略”这一推论。为了提供额外的证据，我们通过设置一个特定场景作为补充实验，将虚维度的参数进行“等值匹配”。此外，研究 1 中设置高低计算难度的方法未进行操纵检验，为了验证这一操纵方法的有效性，我们在补充实验中采用与研究相同逻辑来设置结果参数，即根据数值中所包含的位数多少来确定计算难度的高低，位数越多计算难度越高，并让参与者对参数进行难度进行 0～100 的评分，结果发现这种通过设置金钱结果位数多少的方式是有效的，也保证了在补充实验中三种领域使用的策略的结论是全面和可靠的。补充研究（见 OSF）提供了两方面的证据，一是证明了结果维度的概率/时间/距离参数是否等价，并不妨碍决策者采用维度间差异比较的决策法则；二是证明计算难度的操纵方法是有效可靠的。

3 研究 2 三类决策是否以“维度差判断”方式达成最终选择？来自

直观模拟天平的证据

研究 1 证明个体会对选项间的虚实维度进行维度内比较，但并未证明维度内比较之后，实维度与虚维度之间的维度差判断是否可以直接解释选择结果的变化。因此，研究 2 直接检验维度差判断的中介作用，提供更为直接的证据。鉴于齐当别理论（Li, 1994, 1998, 2004; 2005; 2016）的核心假设是以维度间差异比较的方式达成决策，我们在研究 2 中依据齐当别理论假设来构建参数。

齐当别模型认为人类的决策过程是一个齐同决策的过程，即首先将差异小的维度进行齐同，并将差异大的维度作为决策维度，在差异大的维度上选择占优的选项。基于这一逻辑，研究 2 中通过中介分析，探索齐当别理论所假设的“维度间判断”是否可以解释选择结果的变化。

3.1 参与者

借鉴 Schoemann 等（2017）所提出的探究中介效应所需样本量的方法（https://schoemanna.shinyapps.io/mc_power_med/），抽样重复次数为 5,000 次，α，β 和 c 路径的大小设置为 0.30（中等大小），统计检验力为 β = 0.80，计算发现，要使中介变量的间接效应达到 80%的统计检验力，至少需要 160 人。共招募 196 名浙江某高校大学生，其中 4 人因问卷作答不完整予以删除，有效样本量 192 名（$N_{女性} = 80$，平均年龄 21.85 ± 2.24 周岁）。参与者在实验前签署知情同意书，实验后可获得一份小礼品作为实验报酬。

3.2 实验材料

预期理论（Kahneman & Tversky, 1979）是风险决策中最具影响力的理论。该理论的贡献之一是其为解决艾勒悖论（Allais, 1953）推导出了非线性权重函数的一个重要特征：**次比例性**。该特性因其能够对艾勒悖论提出合理的解释显得意义非凡。为了从风险决策延伸到跨期和空间决策，并对三种决策领域进行比较，我们在三种领域中构建了相应的参数。

首先采用 Kahneman 和 Tversky（1979）推导出次比例特性的参数作为风险领域的参数，并用相同的逻辑和方法构建跨期和空间领域中的参数。根据 Kahneman 和 Tversky（1979），次比例特性是通过参数选择进行一系列演绎推导出来的，即，当同时在选项中的概率维度上乘以一个共同的比例 r，概率的权重会降低，具体来说，当对（x, p）和（y, pq）的选择无差异时，同时在概率上乘以一个 r 后，个体会更偏向于（y, pqr）而非（x, pr）（$0 < p, q, r \leq 1$）。基于 Kahneman 和 Tversky（1979）在推导次比例特性时采用的参数，我们将其参数设计方法延伸应用到跨期和空间领域，即，分别在虚维度上（概率/时间/距离）乘以数值 r（$0 < r \leqslant 1$）构成实验参数。通过这一操作，我们首先探索风险、跨期和空间决策是否共享次比例的选择模式，如果三类决策共享次比例这一特性，也可侧面证明三类决策具有内部一致性；其次，我们探索齐当别理论所假设的“维度间差异判断”是否可以同时解释三类决策中共享的次比例特性的选择结果。

研究 1 发现在风险决策领域中，个体在高计算难度的反应时短于低计算难度的反应时，一是说明任务计算难度可能会潜在地影响决策策略选择，二是启示我们在高计算难度的情景下，个体认知能力不足以完成复杂的补偿性/选项性的计算，则更可能转而采用非补

偿性/维度性的比较法则，通过维度差判断达成决策。因此，研究 2 再次引入决策难度作为调节变量，事后操纵检验发现计算难度高低的分组有效，并根据以上逻辑提出如下假设：

H_4：维度间差异比较可作为中介变量解释三种决策领域中的选择结果；

H_5: 任务计算难度通过调节维度差判断的大小影响中介机制。具体表现为：在高计算难度下的维度差判断可作为中介变量解释选择结果的变化；在低计算难度下的维度差判断不可作为中介变量解释选择结果的变化。

基于齐当别理论的假设，次比例效应出现与否的关键在于“选项中的维度间差异判断是否发生变化”。即：如果乘以 r 后改变了“不同维度间的差异”则会出现次比例效应，而如果乘以 r 后并没有改变“不同维度间的差异”，就不会产生次比例效应。为进一步考察维度差的潜在作用，本研究依据此逻辑设计了两套参数，第一套参数被有意设计为乘以 r 后，“不同维度间的差异”（见附录表 A1 第一对和第二对）随之可能会发生变化、甚至反转；第二套参数被有意设计为乘以 r，“不同维度间的差异（见附录表 A1 第一对和第三对）仍然保持现状、不会随之产生变化。如果在实验中能够观测到这一结果，便可得出维度间差异比较是人类决策背后的核心机制这一结论。

遵循同一逻辑，在风险决策领域，选项参数采用推导出“次比例”特性的原题（Kahneman & Tversky, 1979），并依据原题设置了另一组计算难度高的参数；跨期决策领域中，已发现了违背不变性的延迟间隔效应（Delay duration effect）（Dai & Busemeyer, 2014），该效应虽然没有被命名为“次比例性”特性，但有着与“次比例性”共同的逻辑，即，同时对虚维度上的结果（2 个时间点）进行乘积处理，风险领域中在概率维度上乘以数值 r（$0 < r \leq 1$），跨期领域中在延迟时间维度上同样乘一个数值 r（$0 < r \leq 1$）。据我们所知，在空间决策中还没有人提过“次比例”，我们沿用类似的逻辑，即，对虚维度（距离）结果进行乘积处理，即在距离维度上对 2 个地点乘以一个数值 r（$0 < r \leq 1$）进行参数构建。

3.3 实验流程

本研究采用纸笔测验，被试内实验设计，共包含 18 对选择题，以及对应的 18 个维度差判断任务，实验流程见图 7。

选择任务

首先，参与者被要求在风险、跨期和空间领域中的二择一备选项中进行偏好选择（6 点量表）。

维度差判断任务

其次，直观模拟天平任务中，参与者被要求从 A 到 G 的 7 点量表上评估自己的主观差异判断，并做出选择（图 8）。江程铭等人（2016）开发了直观模拟天平，并首次用来比较了跨期决策中“实维度间差别”和“**时间**维度间差别”（虚维度间差别），Huang 等人（2021）随即改造了直观模拟天平并用其比较了风险决策中“实维度间差别”和“**概率**维度间差别”（虚维度间差别），在本研究中，我们补齐了空间决策中“实维度间差别”和“**空间**维度间差别”（虚维度间差别）的比较。即，用直观模拟天平一并比较了“实维度间差别”（ΔOutcome $_{A,B}$）和三种领域的“虚维度间差别”（ΔProbability $_{A,B}$ /ΔDelay $_{A,B}$ /ΔSpace $_{A,B}$）。

在直观模拟天平中（图 8, a/b/c），天平左端代表两个选项在虚维度上的差异，右端代表两个选项在实维度上的差异。如果参与者认为虚维度的差异大于实维度的差异，天平向左倾斜（即 A-C）；如果认为实维度的差异大于虚维度的差异，天平向右倾斜（即 E-G）；如果两者差异相似，天平保持水平（即 D）。天平倾斜程度越大代表差异越大。

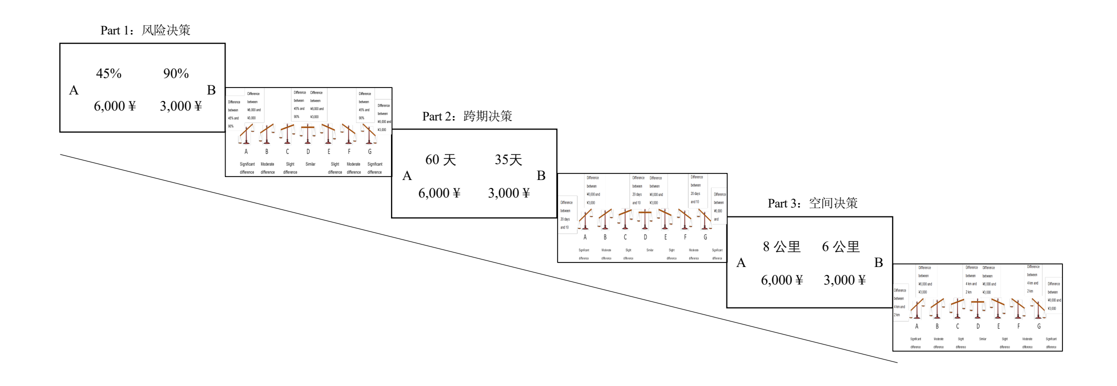


图 7 研究 2 实验流程图

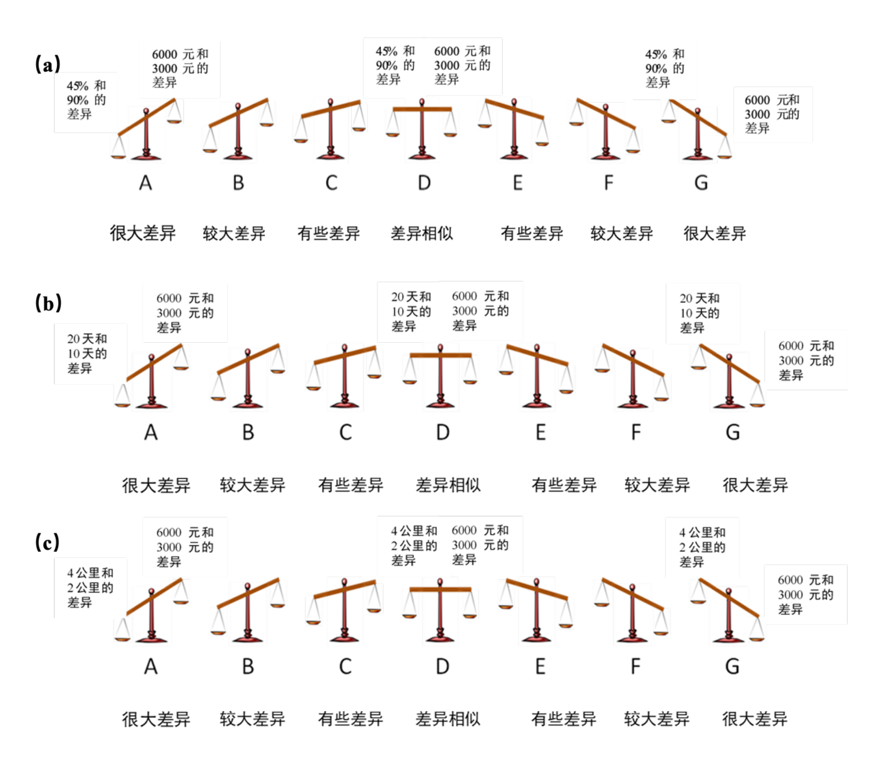


图 8 风险(a), 跨期(b)和空间(c)领域中的直观模拟天平示意图

3.4 结果与分析

我们在“3.2 实验材料”中详细讲述了如何通过构建参数来验证三类决策是否以维度间差异比较的方式达成决策。为了更为全面且彻底的验证维度间差异比较所起的作用，分别依据“齐当别理论”操纵了维度间的差异：**改变**不同维度间的差异和**不改变**维度间的差异。如果**改变**不同维度间的差异能引起选择结果的变化，而**不改变**不同维度间的差异就不会引起选择结果的变化，方能从正反两方面证明维度间差异比较在解释选择结果中所起的作用。

该章节数据分析也据此分为两部分：第一部分为参数被有意设计为乘以 *r* 后，“不同维度间的差异”（3.4.1 和 3.4.2）随之可能会发生变化、甚至反转的参数；第二部分为参数被有意设计为乘以 *r*，“不同维度间的差异（3.4.3 和 3.4.4）仍然保持现状、不会随之产生变化的参数。该两部分分析旨在探究维度差的变化会导致选择结果的变化。

为排除共同方法偏差对实验结果的影响，采用 Harman 单因素检验（Podsakoff et al., 2003）对问卷中所有变量进行分析，结果显示：第一个因子的特征值为 7.18，解释率为 19.95%，研究 2 不存在共同方法偏差。

3.4.1 有意改变“不同维度间的差异”判断的选择结果

本部分呈现了“有意改变不同维度间差异”的结果（附录表 A1 中第一对和第二对参数），结果发现，三种领域中所有题目对中的选择变化均达到显著水平（$ps < 0.001$）。为进一步确认该参数会引起人们的选择发生反转（Kahneman &Tversky, 1979），我们将 6 点量表转换为二分变量，对转换好的数据采用 *McNemar* 检验后发现，所有的题目对前后均发生反转，达到显著水平（$ps < 0.001$），说明在跨期和空间决策中发现了类似风险决策中的次比例特性，从共享行为效应的角度为回答三种决策类型的一致性提供了支持性证据。我们接下来将探索其是否存在共同的内部加工机制。

在表 2 的描述性结果中，三种决策领域中计算难度高低任务中的两对选择题均发生偏好反转，且天平评分可以在一定程度上预测选择偏好。以风险决策的计算高难度任务为例，首先两对选择题发生偏好反转（由偏好 B 转为偏好 C），其次，在天平评分中第一对选择题（$M = 3.09$）小于第二对选择（$M = 5.25$），说明第一对选择题更倾向于在概率维度上决策，而第二对选择题中结果维度是决策维度，所以在第一对选择题中选择了概率占优的 B 选项，在第二对选择题中选择了结果占优的 C 选项。

表 2 三种决策领域选择结果的描述性统计

		风险决策				**跨期决策**				**空间决策**			
		选择结果		**天平评分**		**选择结果**		**天平评分**		**选择结果**		**天平评分**	
计算难度	**参数**	*M*	*SD*	*M*	*SD*	*M*	*SD*	*M*	*SD*	*M*	*SD*	*M*	*SD*
低	**第一对**	4.66(B)	1.35	3.22	1.69	4.94(B)	1.58	2.60	2.15	3.13(A)	1.83	4.05	2.13
	第二对	1.67(C)	1.2	5.23	2.32	1.57(C)	1.18	5.32	2.26	1.34(C)	1.02	5.67	2.08
高	**第一对**	4.85(B)	1.37	3.09	1.55	5.41(B)	1.12	2.36	2.17	3.01(A)	1.95	4.30	2.21
	第二对	1.96(C)	1.51	5.25	2.06	2.12(C)	1.66	4.88	2.28	1.50(C)	1.28	5.52	2.27

注：选择偏好为六点量表，因此 $M < 3.5$ 代表选 A (C)，$M > 3.5$ 代表选 B (D)，括号内的字母为转化后的参与者选择，可以看到两对选择中发生了选择反转

3.4.2 维度间差异比较是否可以解释选择结果的反转

本节旨在考察直观模拟天平所测量的“维度差判断”是否可以作为中介变量解释选择结果的变化，以及任务计算难度是否会调节该中介效应，其路径分析模型如图 9 所示。

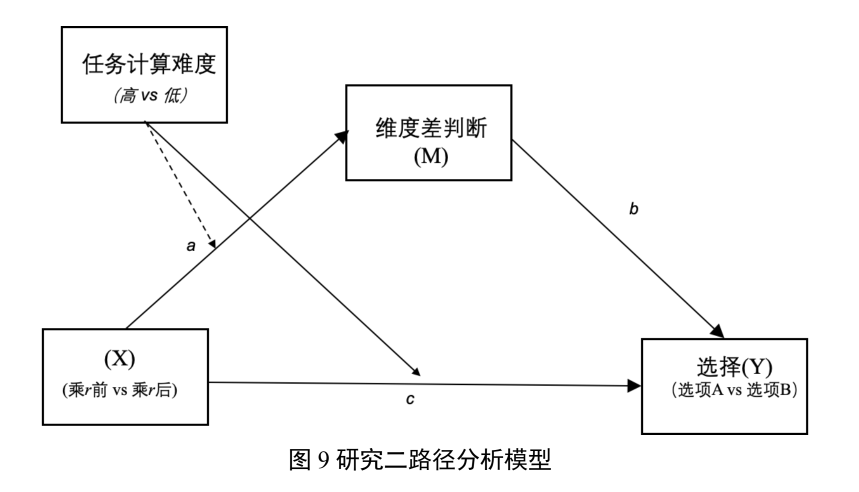


图 9 研究二路径分析模型

参照 Kuang 等人（2022）使用的有调节的中介分析方法，以维度差判断（*M*）为因变量，以"乘以 *r* 前后"（*X*）和"任务计算难度"（*W*）为自变量进行方差分析，如果 *X*W* 交互作用显著，说明 *W* 可能是影响整条中介链的潜在调节变量。结果发现在三个决策领域中，"乘以 *r* 前后"的主效应均显著（$ps < 0.001$），说明本研究设置的乘以 *r* 前后的实验材料引起了个体的维度差判断；任务计算难度的主效应不显著（$ps > 0.05$；除了跨期领域 $p = 0.03$），这说明风险和空间领域中维度差判断并不受任务计算难度的影响，跨期领域中的维度差判断受到任务计算难度的影响；*X*W* 的交互作用均不显著（$ps > 0.05$），说明乘以 r 前后对维度差判断的作用不受任务难度的调节，不支持 H_5 中关于调节效应的假设。基于以上分析，我们在后续分析中不再考虑将任务计算难度作为调节变量，仅将其作为控制变量放入模型中，重点聚焦于检测维度差判断的中介效应。

在中介分析中，将所有变量进行标准化处理，抽样次数为 5,000 次，并将任务计算难度和被试编号作为控制变量放入模型中，如果置信区间中不包含 0，说明中介效应存在（Hayes, 2009）。三种决策领域中的中介分析结果一致发现：维度间判断可以作为中介变量解释选择结果的变化（图 10）。首先，在三种决策领域中，选择偏好在乘以 *r* 前后一致的发生了选择反转（路径 *c*, $ps < 0.001$）；其次，直观模拟天平所测量的"维度差判断"差异均显著（路径 *a*, $ps < 0.001$），说明乘以 *r* 之后引起了维度差判断的显著变化；最后，三种领域中的间接效应的 95%置信区间内不包含 0，说明存在中介效应，支持了 H_4 中关于中介机制的假设。

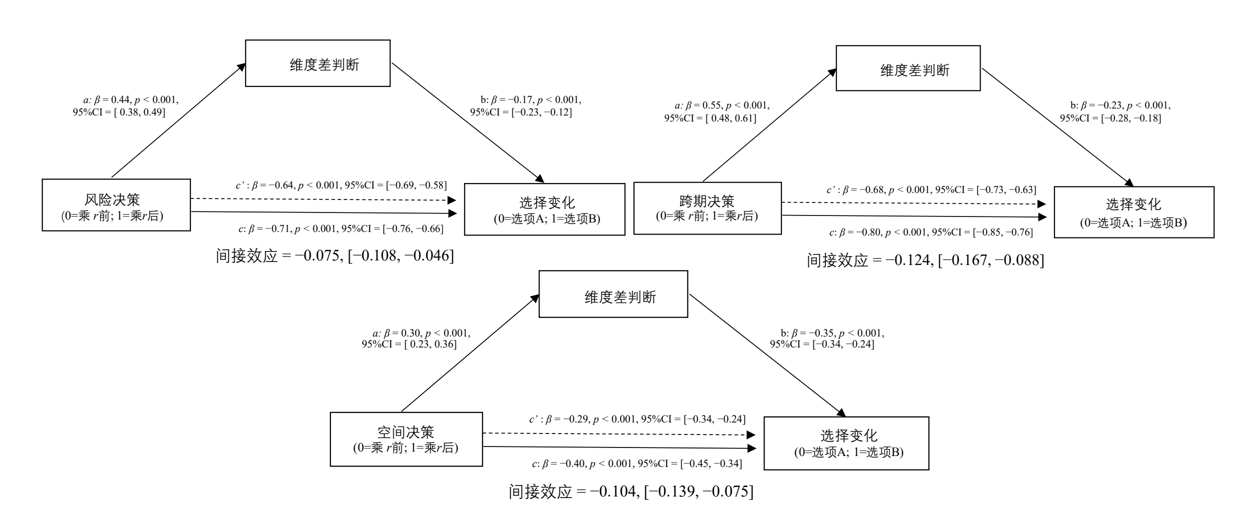


图 10 有意改变“不同维度间的差异”判断的选择结果条件下，三种领域的中介分析结果

综上结果发现，“以虚对实”的基于维度的比较法则可以解释选择反转现象，我们进一步考察这种比较法则是否可以解释选择偏好不反转现象，以期拓展“以虚对实”维度比较法则的解释范围。

3.4.3 无意改变“不同维度间的差异”判断的选择结果

为考察参与者对本研究设计的参数作答是否符合未改变维度差判断，不会发生选择反转的要求（附录表 A1 中第一对和第三对），*T* 检验发现所有参与者在三种决策领域中的选择均达到显著水平（$ps < 0.05$）。对原始选择数据（6 点）进行二分转换后发现，6 对题目中有 4 对题目对前后均未发生反转（$ps > 0.05$），但跨期和空间决策中低计算难度题目发生了反转（ $x^2_{跨期} = 6.26, p < 0.05, φ = 0.18$；$\chi^2_{空间} = 6.92, p = 0.01, φ = 0.19$），基本符合我们的实验预期。OSF 附录中总结了转换后的选择结果和 *McNemar* 结果。

3.4.4 维度间差异比较是否可以解释选择结果的不反转

在选择结果不发生反转的条件下，我们试图验证参与者是否同样会遵循“维度间的差异比较”以达成最终选择。参照 Kuang 等人（2022）在进行有调节的中介的分析方法，我们发现，在三种决策领域中，跨期和空间领域中“乘以 *r* 前后”的主效应均不显著（$ps > 0.05$；除了风险领域 $p = 0.01$），说明本研究设置的乘以 *r* 前后的实验材料如预期一致，并没有引起维度差的变化；任务计算难度的主效应均不显著（$ps > 0.05$），说明维度差判断并不受任务计算难度的影响；两者的交互作用不显著（$ps > 0.05$），说明乘以 r 前后对维度差判断的作用不受任务难度的调节，不支持 H_5 中关于调节效应的假设。同样基于以上分析，不考虑任务计算难度，仅将其作为控制变量放入模型中，聚焦于检测维度差判断的中介效应。

采用与 3.4.2 同样的方法进行中介分析发现，“维度间的差异比较”依然可以用来解释选择结果（路径 *b*，$ps < 0.05$），说明在选择不反转参数中个体依然是以齐当别理论所假设的“维度间差异比较”的方式来处理实维度差异和虚维度差异信息而达成最终选择（见图 11）。

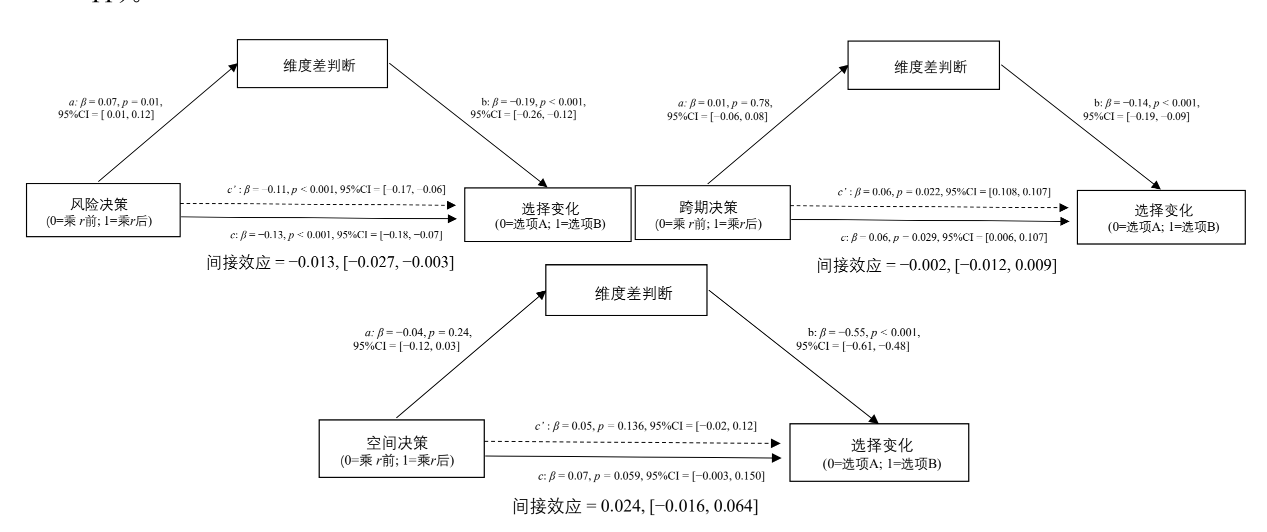


图 11 无意改变“不同维度间的差异”判断的选择结果条件下，三种领域的中介分析结果

综上，我们通过操纵的方法，从“有意改变”和“无意改变”维度差判断两个层面探索了维度差判断对选择结果的预测效果，结果发现三种领域中人们均通过维度间差异比较来达成最终选择。同时，本研究将任务计算难度作为调节变量探索其对维度差判断的影响，结果发现维度差判断的中介机制不受该调节变量的影响。鉴于研究 1 发现在风险决策领域中个体在高计算难度的反应时短于低计算难度的反应时，以及研究 2 发现任务难度影响跨期决策任务中的天平判断，虽然没有在研究 2 中整体地侦测到任务难度的调节效应，但这部分数据或暗示任务计算难度确实对决策策略有潜在影响。之所以我们没能在本研究中侦测到任务难度的调节效应，这抑或与我们采用的任务难度操纵手段有关。未来研究可以专门对此问题进行深入探索。此外，研究 1 中发现相比于风险和跨期决策，个体在空间决策领域中更倾向于采用非补偿性/维度性的决策策略，通过简单比对上述中介分析中路径 *b* 的系数发现，空间决策领域在预测效果上也更好，基于此，我们做了进一步探索性分析。

为了探究人类较早习得的空间感知能力与人类较自然采用的维度比较策略（Tversky, 1969）两者之间的内在联系或隐含的意义，我们进一步分析研究 2 三种领域中“维度差间的判断”与“选择”之间的关系模式。将每个领域中所有的题目进行合并，得到中介变量与因变量之间的总回归系数，发现空间（−0.535）和跨期（−0.536）决策的解释系数大于风险（−0.443）决策，该模式与眼动的 SM 值模式不谋而合，尤为值得关注。与空间决策相关的空间感知能力在个体与环境的日常互动中起着重要的作用，有研究发现婴儿仅能根据自己的身体来表征位置，亦有一些研究发现儿童在 2~3 岁便开始意识到处于不同位置的观测者可能会有不一样的观点。与跨期决策相关的对未来时间的主观感知能力同样在人类动机中起着至关重要的作用（Carstensen, 2006），研究发现儿童直到 14 岁才能发展出于成人类似的时间估计能力（Smythe & Goldstone, 1957），而与风险决策相关的抽象的概率理解能力的掌握时间晚于空间感知和时间感知能力的掌握。基于此，我们认为作为人类最先发展的空间感知能力和后期才掌握的抽象概率能力，直接影响了人类的决策策略偏好。这一发现或可引导我们将决策领域的研究与人类进化历程结合起来，促使更好地引导人类认识自己。

4 总讨论

人类凭什么能别于其他物种而跃然成为“万物之灵”？人类处理概率、时间、距离这类“虚构”信息以进行风险、跨期、空间决策的独有能力当是其重要原因。本研究通过两个研究表明：在风险、跨期和空间决策中，虽然其所构成的虚维度（概率、时间和距离）在语义上看起来明显不同，但是三种领域的决策策略一致表现出“以虚对实”的维度比较策略。

研究 1 通过眼动技术记录决策过程中的眼球运动来获取决策策略证据，发现三种决策领域在信息加工方式上均表现出基于维度的眼跳模式，更加符合非补偿性/维度性的“以虚对实”决策策略。该方法可以从过程上寻找信息输入和结果输出之间的关系，揭示决策背后的机制，但毕竟所有决策都离不开人脑的基础，研究者（Park et al., 2019）发现当需要改变一个人的决策策略时，参与策略转换的脑区也会出现相应的变化，这也印证了未来采用神经科学方法探索决策策略的有效性和实时性，未来研究可以采用 fMRI 等方法考察三种决策领域中所激活的脑区是否一致，从神经科学的角度提供更为基础的数据支撑。同时，

本研究涉足的还是纯粹的风险、跨期和空间决策，未来研究可以考虑将备选项同时设置成同时包含风险、跨期和空间三类决策的选项，例如在风险选项中加入跨期和空间的概念，探寻其对选择结果的影响等。

对研究 1 支持“以虚对实”决策策略的结果，可能会出现 2 种不同的解读：1）根据眼脑假设观点（Eye-mind hypothesis），在认知加工处理的过程中，人眼看到的与大脑中思考的是同步的（Daneman & Carpenter, 1980），因而眼动指标可以很好地研究其中的认知机制和注意过程，揭示大脑的活动（黄龙 等, 2020）；2）眼动技术更多地反映的是个体在认知加工过程中的信息检索过程，对于属于大脑计算尤其是自动计算的过程很难考察到，导致了眼动中更难捕捉到快速的自动计算过程，因此认知过程信息检索和大脑神经编码之间还存在鸿沟，这或许也是多数神经证据支持基于选项的策略，而多数眼动过程证据支持基于维度的策略的核心所在。因此，摆在我们面前的下一步工作是，或者检验采用 fMRI 和眼动两种不同的方法得出的结论是否可以直接比较；或者同时采用 fMRI 和眼动两种不同的方法（如，Purcell et al., 2021）以寻找汇聚性证据，从而对两种测量方法得到的证据做出同步的、整合性的解读。

研究 2 借助“直观模拟天平”发现，个体在三个领域中均通过“维度间差异比较”来达成决策。这些发现为未来发展能解释三类决策的通用模型做了数学建模的准备工作。本研究引入的“直观模拟天平”用来对虚维度差异和实维度差异进行比较（两个Δ属于不同量纲）。较之于传统的获得维度间差异比较结果的方法（Li, 1994），使用直观模拟天平的优势在于：1）直观和易于理解，通过视觉辅助线索快速获得主观的差异判断，节约参与者的认知负担；2）天平两端的实维度和虚维度是两个不同的量纲，通过天平的倾斜程度来模拟参与者的主观差异比较，也使得难以进行比较的不同量纲转变为可以比较的相同量纲，将“不可能完成的任务”变为了可能。其中直观模拟天平的评定是采用相对量表测量参与者的选择偏好，相对量表将两个选择放在一起进行比较，位置上的临近可以促使参与者直接对选项中的实维度和虚维度进行直观的对比，是一种更为严格的测量手段（McGraw et al., 2010）。不可否认的是，直观模拟天平范式还略显笨拙，未来可以深挖掘替代方法获得更为生态的比较方法，例如采用决策过程中的眼跳之间的差异等眼动过程指标来客观呈现参与者的维度判断结果。

此外，研究 2 中利用中介分析为维度间差异比较提供了证据，但并没有完全排除基于选项的机制的可能性，未来的研究可以通过使用直观模拟天平这一工具比较“维度间差异比较”和“基于选项的比较”对选择结果的解释熟优熟劣。

本研究还探讨了“任务计算难度”在决策策略选择中的作用。研究 1 发现风险决策领域中的反应时指标受到任务难度调节，研究 2 发现任务难度影响跨期决策任务中的天平判断，但并没有在整体上侦测到任务难度的调节效应，这抑或是本研究采用的难度操纵方法所导致的问题。需要指出的是，本研究对任务计算难度是进行的事后操纵有效性检验，虽然事后操纵检验在一定程度上避免了参与者猜测实验目的影响决策反应策略的缺点，但后置型操纵检验会产生检验效力不足的问题（卫旭华等, 2022），未来研究可考虑采用单独的预实验进行操纵检验，从而使降低实验误差。迄今为止，没有一个（成熟的）模型或理论可以令人满意地指导我们如何从一组**未给定**的策略集之中进行策略选择，以便从**给定**的一组选项中做出选择。我们引入任务计算难度的初步探索或许可以为未来的研究提供启发，未来可继续探索影响决策策略的其他潜在变量，如思维方式（Ares et al., 2014）、单次或多次重复任务（Su., et al., 2013; 刘洪志等, 2022）、算术能力和认知反思风格等（张阳阳等, 2018）。

本研究还尚存在一些局限性，例如本研究采用假设情景方法，让参与者对抽象的金钱结果进行抉择，但已有研究发现金钱大小（Takagaki & Krug, 2020）以及真实或假设情景中的金钱决策（Hertwig & Ortmann, 2001; Horn & Freund, 2022）会影响个体的真实选择，虽然本研究在三种决策领域中采用同样的金钱数值可在一定程度上减少金钱大小所带来的差异，但未来研究可以考虑将其融入具体的生活场景中，并根据场景选择具体的金额数值。

值得关注的是，本研究发现空间决策相较于风险和跨期决策更倾向于采用非补偿性/维度性的“以虚对实”维度比较策略，同时发现空间决策中的维度差异判断对选择的预测力也更强。对这一连贯（consistent）结果的可能解释是：1）**各领域的建模化程度或水平决定了这种排序**。补偿性/选项性的“化虚为实”建模的现状是，在历史上，风险决策建模建得最早、最“完美”、跨期决策其次、空间决策最粗糙（尚无数学模型）。因此，参与者在面对风险决策时，有可能清楚地知道该用什么补偿性/选项性的数学模型来指导自己做决策，而在空间决策时，却不知道该用什么补偿性/选项性的数学模型来指导决策。因此，最可能采用“以虚对实”策略进行决策的是空间决策，其次是跨期决策，最不可能的是风险决策。作为这一猜想的间接证据，该领域的一些研究人员试图将风险和跨期决策结合在两种不同的见解中，认为风险决策是遵循补偿性/选项性规则，跨期选择遵循非补偿性/维度性的规则（Scholten & Read, 2014）；2）**参与者真实的决策策略决定或影响了理论家对数学模型的建构**。个体的空间认知水平发展得最早、空间交换货物是贸易最原始的起因，人们最自信、最自如在空间决策时，用“以虚对实”策略完成不同量纲比较任务。因此，建模的理论家抑或下意识地觉得在空间决策领域构建一个“化虚为实”的决策模型，或是反直觉、违背自然的做法（其结果是，至今没有催生出一个“化虚为实”的空间决策模型）。

5 研究结论

（1）人们在风险、跨期和空间决策中统一采用一种连贯的、领域一般性的决策策略做出决策。即，通过对选项间的实维度差异和虚维度差异进行比较来达成最终抉择。

（2）在跨期和空间决策中发现了类似风险决策中的次比例特性，从共享行为效应的角度为回答三种决策类型的一致性提供了支持性证据，该共享行为效应产生的机制可连贯地解释为：对维度间差异比较大小的判断是最终抉择是否发生发转的关键。

参考文献

Allais, M. (1953). Le comportement de l'homme rationnel devant le risque: critique des postulats et axiomes de l'école américaine. *Econometrica: Journal of the Econometric Society,* 503–546.

Ares, G., Mawad, F., Giménez, A., & Maiche, A. (2014). Influence of rational and intuitive thinking styles on food choice: Preliminary evidence from an eye-tracking study with yogurt labels. *Food Quality and Preference, 31*, 28−37.

Basu, S., & Savani, K. (2017). Choosing one at a time? Presenting options simultaneously helps people make more optimal decisions than presenting options sequentially. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 139,* 76−91.

Birnbaum, M. H. (2018). Behavioral models of decision making under risk. In: Raue M., Lermer E., Streicher B. (eds) *Psychological Perspectives on Risk and Risk Analysis*. Springer, Cham.

Brandstätter, E., & Gussmack, M. (2013). The cognitive processes underlying risky choice. *Journal of Behavioral Decision Making, 26*(2), 185−197.

Brandstätter, E., & Körner, C. (2014). Attention in risky choice. *Acta Psychologica, 152*, 166−176.

Brandstätter, E., Gigerenzer, G., & Hertwig, R. (2006). The priority heuristic: Making choices without trade-offs. *Psychological Review, 113*(2), 409−432.

Breiter, H. C., Aharon, I., Kahneman, D., Dale, A., & Shizgal, P. (2001). Functional imaging of neural responses to expectancy and experience of monetary gains and losses. *Neuron*, *30*(2), 619−639.

Boroditsky, L. (2000). Metaphoric structuring: Understanding time through spatial metaphors. *Cognition, 75*(1), 1−28.

Böckenholt, U., & Hynan, L. S. (1994). Caveats on a process-tracing measure and a remedy. *Journal of Behavioral Decision Making, 7*(2), 103−117.

Bueti, D., & Walsh, V. (2009). The parietal cortex and the representation of time, space, number and other magnitudes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 364*(1525), 1831–1840.

Buzsáki, G., & Llinás, R. (2017). Space and time in the brain. *Science, 358*(6362), 482–485.

Carstensen, L. L. (2006). The influence of a sense of time on human development. *Science, 312*(5782), 1913−1915.

Chiodo, di S. (2017). Ideality of beauty. Materiali Di Estetica. Terza Serie, 4.1, 96–114.

Chen, H. X., He, G. B. (2011). The effect of construal level on intertemporal choice and risky choice. *Acta Psychologica Sinica, 43*(4), 442−452.

[陈海贤, 何贵兵. (2011). 识解水平对跨期选择和风险选择的影响. *心理学报, 43*(4), 442−452.]

Cheng, J., & González-Vallejo, C. (2016). Attribute-wise vs. alternative-wise mechanism in intertemporal choice: Testing the proportional difference, trade-off, and hyperbolic models. *Decision, 3*(3), 190−215.

Dai, J., & Busemeyer, J. R. (2014). A probabilistic, dynamic, and attribute-wise model of intertemporal choice. *Journal of Experimental Psychology: General, 143*(4), 1489−1514.

Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *19*(4), 450−466.

Ding, X., Feng, N., Cheng, X., Liu, H., & Fan, Z. (2015). Are past and future symmetric in mental time line? *Frontiers in Psychology, 6,* 208–215

Eikmeier, V., Schröter, H., Maienborn, C., Alex-Ruf, S., & Ulrich, R. (2013). Dimensional overlap between time and space. *Psychonomic Bulletin & Review, 20*(6), 1120–1125.

Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A. G. (2009). Statistical power analyses using G* Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods, 41*(4), 1149−1160.

Fisher, I. (1930). The theory of interest as determined by impatience to spend income and opportunity to invest it. New York: Macmillan.

Frederick, S., Loewenstein, G., & O'Donoghue, T. (2002). Time discounting and time preference: A critical review. *Journal of Economic Literature, 40*(2), 351−401.

Gigerenzer, G., & Goldstein, D. G. (1996). Reasoning the fast and frugal way: Models of bounded rationality. *Psychological Review, 103*, 650−669.

Glöckner, A., & Herbold, A. K. (2011). An eye-tracking study on information processing in risky decisions: Evidence for compensatory strategies based on automatic processes. *Journal of Behavioral Decision Making, 24*(1), 71−98.

Gluth, S., Rieskamp, J., & Büchel, C. (2014). Neural evidence for adaptive strategy selection in value-based decision-making. *Cerebral Cortex, 24*(8), 2009−2021.

Gonzalez-Vallejo, C. (2002). Making trade-offs: A probabilistic and context-sensitive model of choice behavior. *Psychological Review*, *109*(1), 137−155.

Green, L., Fristoe, N., & Myerson, J. (1994). Temporal discounting and preference reversals in choice between delayed outcomes. *Psychonomic Bulletin & Review, 1*(3), 383−389.

Green, L., & Myerson, J. (2004). A discounting framework for choice with delayed and probabilistic rewards. *Psychological Bulletin, 130*(5), 769−792.

Hayes, A. F. (2009). Beyond Baron and Kenny: Statistical mediation analysis in the new millennium. *Communication Monographs, 76*(4), 408−420.

He, T. Y, Ding, Y., Li, H. K., Cheng, X. R., Fam, Z., Ding, X. F. (2020). The multidimensional spatial representation of time: Dissociations on its ontogenetic origin and activation mechanism. *Advances in Psychological Science, 28*(6), 935−944.

[何听雨, 丁一, 李昊堃, 程晓荣, 范炤, 定险峰. (2020). 时间的多维度空间表征：分离的起源与激活机制. *心理科学进展, 28*(6), 935−944.]

Hertwig, R., & Ortmann, A. (2001). Experimental practices in economics: A methodological challenge for psychologists? *Behavioral and Brain Sciences*, *24*(3), 383–403.

Horn, S., & Freund, A. M. (2022). Adult age differences in monetary decisions with real and hypothetical reward. *Journal of Behavioral Decision Making, 35*(2), e2253.

Huang, Y. N., Shen, S. C., Yang, S. W., Kuang, Y., Li, Y. X., & Li, S. (2021). Asymmetrical property of the subproportionality of weighting function in prospect theory: Is it real and how can it be achieved? *Symmetry*, *13*(10):1928.

Huang, L, Xu, F. M, & Hu, X. Y. (2020). Scanmatch: A new method for studying decision-making process. *Advances in Psychological Science, 28*(9), 1454−1461.

[黄龙, 徐富明, & 胡笑羽. (2020). 眼动轨迹匹配法: 一种研究决策过程的新方法. *心理科学进展, 28*(9), 1454−1461.]

Jiang, D, He, G. B. (2017). Decision making: Based on the perspective of psychological distance. *Advances in Psychological Science, 25*(11), 1992−2001.

[蒋多, 何贵兵. (2017). 心理距离视角下的行为决策. *心理科学进展, 25*(11), 1992−2001.]

Jiang, C. M., Liu, H. Z., Cai, X, H., & Li, S. (2016). A process test of priority models of intertemporal choice. *Acta Psychologica Sinica*, *48*(1), 59–72.

[江程铭, 刘洪志, 蔡晓红, 李纾. (2016). 跨期选择单维占优模型的过程检验. *心理学报, 48*(1), 59–72]

Jeffreys, H. (1961). *Theory of probability* (3rd ed.). Oxford, UK: Oxford University Press.

Kable, J. W., & Glimcher, P. W. (2007). The neural correlates of subjective value during intertemporal choice. *Nature Neuroscience, 10*(12), 1625–1633.

Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica, 47*(2), 263–291.

Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1976). *Decisions with multiple objectives: Preferences and value trade-offs.* Wiley, New York.

Kuang, Huang, & Li. (2022). A framing effect of intertemporal and spatial choice. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, https://doi.org/10.1177/17470218221113519.

Kundel, H. L., Nodine, C. F., Conant, E. F., & Weinstein, S. P. (2007). Holistic component of image perception in mammogram interpretation: Gaze-tracking study. *Radiology, 242*(2), 396–402.

Wei, Z. H., & Li, X. S. (2015). Decision process tracing: Evidence from eye-movement data. *Advances in Psychological Science, 23*(12), 2029–2041.

[魏子晗, 李兴珊. (2015). 决策过程的追踪：基于眼动的证据. *心理科学进展, 23*(12), 2029–2041.]

Li, S. (1994). *Equate-to-differentiate theory: A coherent bi-choice model across certainty, uncertainty and risk.* University of New South Wales.

Li, S. (1998). Can the conditions governing the framing effect be determined? *Journal of Economic Psychology*, *19*(1), 133−153.

Li, S. (2004). A behavioral choice model when computational ability matters. *Applied Intelligence, 20*(2), 147–163.

Li, S. (2005). Choice reversals across certainty, uncertainty and risk: The equate-to-differentiate interpretation. *Acta Psychologica Sinica*, *37* (4), 427–433.

Li, S. (2016). *An equate-to-differentiate way of decision-making*. Shanghai: East China Normal University Press. [李纾. 决策心理: 齐当别之道[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2016]

Li, S., Li, Y. R., Su, Y., & Rao, L. L. (2012). Is an idea different from cake: can you have it and eat it, too? A violation of permanence in information consumption. *PLoS ONE. 7*(7): e41490.

Liu, H. Z., Jiang, C. M., Rao, L. L., & Li, S. (2015). Discounting or priority: Which rule dominates the intertemporal choice process? *Acta Psychologica Sinica*, *47*(4), 522–532.

[刘洪志, 江程铭, 饶俪琳, 李纾. (2015). "时间折扣"还是"单维占优"？——跨期决策的心理机制. *心理学报, 47*(4), 522–532.]

Liu, H. Z., Li, X. S., Li, S., & Rao, L. L. (2022). When expectation-maximization-based theories work or do not work: An eye-tracking study of the discrepancy between everyone and every one. *Acta Psychologica Sinica, 54*(12), 1517–1531.

[刘洪志, 李兴珊, 李纾, 饶俪琳. (2022). 基于期望值最大化的理论何时失效：风险决策中为自己-为所有人决策差异的眼动研究. *心理学报, 54*(12), 1517–1531.]

Loewenstein, G., & Prelec, D. (1992). Anomalies in intertemporal choice: Evidence and an interpretation. *Quarterly Journal of Economics, 107*(2), 573−597.

May, J., & Thrift, N. (Eds.). (2001). Timespace: Geographies of temporality. London: Routledge

Mazur, J. E. (1987). An adjusting procedure for studying delayed reinforcement. In M. L. Commons, J. E. Mazur, J. A. Nevin, & H. Rachlin (Eds.), *Quantitative analysis of behavior: The effect of delay and of intervening events on reinforcement value* (pp. 55–73). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

McGraw, A. P., Larsen, J. T., Kahneman, D., & Schkade, D. (2010). Comparing gains and losses. *Psychological Science, 21*(10), 1438−1445.

Olschewski, S., & Rieskamp, J. (2020). Distinguishing three effects of time pressure on risk taking: Choice consistency, risk preference, and strategy selection. *Journal of Behavioral Decision Making*, 1−14.

Pachur, T., Hertwig, R., Gigerenzer, G., & Brandstätter, E. (2013). Testing process predictions of models of risky choice: A quantitative model comparison approach. *Frontiers in Psychology, 4*, 646.

Park, S. A., Sestito, M., Boorman, E. D., & Dreher, J. C. (2019). Neural computations underlying strategic social decision-making in groups. *Nature Communications, 10*(1), 1−12.

Pärnamets, P., Johansson, P., Hall, L., Balkenius, C., Spivey, M. J., & Richardson, D. C. (2015). Biasing moral decisions by exploiting the dynamics of eye gaze. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *112*(13), 4170−4175.

Payne, J. W., & Braunstein, M. L. (1978). Risky choice: An examination of information acquisition behavior. *Memory & Cognition, 6*(5), 554−561.

Payne, J.W., Bettman, J.R., & Johnson, E.J. (1993). *The Adaptive Decision Maker.* Cambridge University Press: New York.

Payne, J. W., Bettman, J. R., & Johnson, E. J. (1988). Adaptive strategy selection in decision making. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 14,* 534–552.

Pellegrini, P. A., & Fotheringham, A. S. (2002). Modelling spatial choice: A review and synthesis in a migration context. *Progress in Human Geography, 26*(4), 487−510.

Podsakoff, P. M., MacKenzie, S. B., Lee, J. Y., & Podsakoff, N. P. (2003). Common method biases in behavioral research: A critical review of the literature and recommended remedies. *Journal of Applied Psychology*, *88*(5), 879−903.

Purcell, J. R., Jahn, A., Fine, J. M., & Brown, J. W. (2021). Neural correlates of visual attention during risky decision evidence integration. *NeuroImage*, *234*, 117979.

Rachlin, H. (2006). Notes on discounting. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior, 85*, 425–435.

Rachlin, H., Brown, J., & Cross, D. (2000). Discounting in judgments of delay and probability. *Journal of Behavioral Decision Making, 13*, 145−159.

Ratcliff, R., Smith, P. L., Brown, S. D., & McKoon, G. (2016). Diffusion decision model: Current issues and history. *Trends in Cognitive Sciences*, *20*(4), 260–281.

Rao, L. L., Li, S., Jiang, T., & Zhou, Y. (2012). Is payoff necessarily weighted by probability when making a risky choice? Evidence from functional connectivity analysis. *PLoS One*, *7*(7), e41048.

Rao, L. L., Liu, X. N., Li, Q., Zhou, Y., Liang, Z. Y., Sun, H. Y., … Li, S. (2013). Toward a mental arithmetic process in risky choices. *Brain and Cognition*, *83*(3), 307–314.

Read, D. (2004). *Intertemporal choice.* Blackwell handbook of judgment and decision making, 424–443.

Reeck, C., Wall, D., & Johnson, E. J. (2017). Search predicts and changes patience in intertemporal choice. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 114*(45), 11890–11895.

Rotter, J. B. (1954). *Social learning and clinical psychology.* New York: Prentice-Hall.

Sarukkai, S. (2009). Phenomenology of untouchability. *Economic and Political Weekly, 44*(37), 39–48. JSTOR.

Schoemann, A. M., Boulton, A. J., & Short, S. D. (2017). Determining power and sample size for simple and complex mediation models. *Social Psychological and Personality Science, 8*(4), 379−386.

Schulte-Mecklenbeck, M., Johnson, J. G., Böckenholt, U., et al. (2017). Process-tracing methods in decision making: On growing up in the 70s. *Current Directions in Psychological Science, 26*(5), 442–450.

Scholten, M., & Read, D. (2014). Prospect theory and the "forgotten" fourfold pattern of risk preferences. *Journal of Risk and Uncertainty*, *48*(1), 67−83.

Scholten, M., Read, D., & Sanborn, A. (2014). Weighing outcomes by time or against time? Evaluation rules in intertemporal choice. *Cognitive Science, 38*(3), 399−438.

Smythe, E. J., & Goldstone, S. (1957). The time sense: A normative, genetic study of the development of time perception. *Perceptual and Motor Skills, 7*(1), 49−59.

Sheppard, E. S. (1980). The ideology of spatial choice. *Papers of the Regional Science Association, 45*(1), 197–213.

Su, Y., Rao, L. L., Sun, H. Y., Du, X. L., Li, X., & Li, S. (2013). Is making a risky choice based on a weighting and adding process? An eye-tracking investigation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 39*(6), 1765−1780.

Takagaki, K., & Krug, K. (2020). The effects of reward and social context on visual processing for perceptual decision-making. *Current Opinion in Physiology*, *16*, 109–117.

Tversky, A. (1969). Intransitivity of preferences. *Psychological Review, 76*(1), 31−48.

Tversky, A. (1972). Elimination by aspects: A theory of choice. *Psychological Review, 79*, 281–299.

Ulrich, R., & Maienborn, C. (2010). Left–right coding of past and future in language: The mental timeline during sentence processing. *Cognition, 117*(2), 126−138.

Van Duijvenvoorde, A. C., Figner, B., Weeda, W. D., Van der Molen, M. W., Jansen, B. R., & Huizenga, H. M. (2016). Neural mechanisms underlying compensatory and noncompensatory strategies in risky choice. *Journal of Cognitive Neuroscience, 28*(9), 1358−1373.

Viard, A., Doeller, C. F., Hartley, T., Bird, C. M., & Burgess, N. (2011). Anterior hippocampus and goal-directed spatial decision making. *Journal of Neuroscience, 31*(12), 4613−4621.

von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1947). *Theory of Games and Economic Behavior* (2nd ed.). Princeton: Princeton University Press.

Von Sobbe, L., Scheifele, E., Maienborn, C., & Ulrich, R. (2019). The space-time congruency effect: A meta-analysis. *Cognitive Science, 43*(1), e12709.

Wei, X. H, Wang, G. W, & Chen, Y. (2022). Manipulation checks in the managerial psychology experiment in China: Current status, problems, and suggestions. *Advances in Psychological Science, 30*(6), 1367−1376.

[卫旭华, 汪光炜, 陈义. (2022). 国内管理心理实验中的操纵检验: 现状、问题与建议. *心理科学进展, 30*(6), 1367−1376.]

Weger, U. W., & Pratt, J. (2008). Time flies like an arrow: Space-time compatibility effects suggest the use of a mental timeline. *Psychonomic Bulletin & Review, 15*(2), 426−430.

Wiener, J. M., Hölscher, C., Büchner, S., & Konieczny, L. (2012). Gaze behaviour during space perception and spatial decision making. *Psychological Research, 76*(6), 713−729.

Xue, Y., & Brown, D. E. (2003). A decision model for spatial site selection by criminals: A foundation for law enforcement decision support. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, *33*(1), 78−85.

Zhang, Y. Y., Zhou, L., You, X. Q., Li, S., & Liang, Z. Y. (2018). Is intertemporal decision-making based on a temporal discounting process? Evidence from double-dissociation paradigm. *Scientia Sinica (Vitae), 48*(5), 592−608.

[张阳阳, 周蕾, 游旭群, 李纾, 梁竹苑. (2018). 跨期决策是否基于“折扣计算”：来自双分离范式的证据. *中国科学: 生命科学, 48*(5), 592−608.]

Zhang, Y, Y., Zhou, L., Li, S., Liang, Z, Y. (2022). Computation of subjective value does not always elicit alternative-based information searching in intertemporal choice. *Journal of Behavioral Decision Making*, 35: e2274.

Zhou, L., Li, A. M., Zhang, L., Li, S., & Liang, Z. Y. (2019). Similarity in processes of risky choice and intertemporal choice: The case of certainty effect and immediacy effect. *Acta Psychologica Sinica, 51*(3), 337−352.

[周蕾, 李爱梅, 张磊, 李纾, 梁竹苑. (2019). 风险决策和跨期决策的过程比较:以确定效应和即刻效应为例. *心理学报, 51*(03), 337−352.]

Zhou, L., Zhang Y. Y., Li, S., & Liang, Z, Y. (2018). New paradigms for the old question: Challenge the expectation rule held by risky decision-making theories. *Journal of Pacific Rim Psychology*, *12*(e17), 1−10.

Toward a coherent understanding of risky, intertemporal, and spatial choices：Evidence from eye-tracking and subjective evaluation

HUANG Yuanna [1,2], JIANG Chengming [3], LIU Hongzhi [4], LI Shu [2,5*]

([1] *School of Economics and Management, Tsinghua University*, Beijing 100084, *China*)
([2]*Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
([3]*School of Management, Zhejiang University of Technology, Hangzhou* 310023, *China*)
([4]*Department of Social Psychology, Zhou Enlai School of Government, Nankai University, Tianjin* 300350, *China*)
([5]*Department of Psychology and Behavioral Sciences, Zhejiang University, Hangzhou* 310028, *China*)

Abstract

The fundamental issue regarding the difference between humans and animals has puzzled researchers in a broad range of academic fields and specializations. The ability to trade, which symbolizes the progress of human civilization, may be regarded as an important distinction between humans and animals. To sustain a trading activity, people need to deal with the possible issues of long-distance delivery (spatial choice), delayed delivery (intertemporal choice), and unfulfilled delivery (risky choice) in the exchange of goods.

These choices of different domains were well represented by the tangible (outcome) and intangible (probability/time/space) dimensions. Normally, the family of compensatory rules assumes that choice should be reached by comparing options which have been converted into the same units of quantity (Overall Payoff $_A$ vs. Overall Payoff $_B$) in a way of “translating intangible elements into tangible ones” algorithm. Whereas, the family of non-compensatory rules assumes that choice should be reached by directly comparing values measured using different units of quantity (ΔOutcome $_{A,\,B}$ vs. ΔProbability $_{A,\,B}$ /ΔDelay $_{A,\,B}$ /ΔSpace $_{A,\,B}$) in a way of “pitting intangible elements against tangible ones” rule. To test whether human beings have the potential to deal with the intangible dimensions of the data, the present paper attempts to obtain evidence to support the “pitting intangible elements against tangible ones” rules from a variety of decision tasks, which were formed by combing both tangible and intangible dimensions.

Study 1 aims to examine whether outcome difference between options and the probability/time/space difference between options were directly compared in three choice domains by using the eye-tracking technique. Our findings show that, from the group-level, decision makers perform a consistent dimension-based search pattern in the three domains, indicating that the decision processes are more dependent on a way of intra-dimensional comparison. From the individual-level, the vast majority of participants were classified as decision makers who using dimension-based strategy. Moreover, the two index we constructed, difference in gaze duration and difference in saccades frequency, could significantly predict the behavioral choice shift. Those

results provide supporting evidence for dimensioned-based strategy in three choice domains.

However, Study 1 is still unable to answer the further question of whether the final decisions are reached through a process of comparing the eye movement information of $\Delta\text{Outcome}_{A,B}$ with $\Delta\text{Probability}_{A,B}$ /$\Delta\text{Delay}_{A,B}$ /$\Delta\text{Space}_{A,B}$. Study 2 therefore borrows a Visual Analog Scale to further examine whether the $\Delta\text{Outcome}_{A,B}$ and $\Delta\text{Probability}_{A,B}$ /$\Delta\text{Delay}_{A,B}$ /$\Delta\text{Space}_{A,B}$ were treated in an equate-to-differentiate way in reaching the final decisions in three domains. Our findings indicate that the decisions can be made by the way of "intra-dimensional difference evaluation" prescribed by equate-to-differentiate theory.

The current paper provides supportive evidence for the comparison rule of "pitting intangible elements against tangible ones" and break a new ground different from the "translating intangible elements into tangible ones" algorithm. Future studies may consider the development of a general model to explain the choices of three different domains.

Key words: Eye-tracking technique, Visual analog scale, Tangible and intangible dimension, Intra-dimensional evaluation, Comparison between different units of quantity

附录（Appendix）

表 A 1 研究 2 实验参数

	风险决策		跨期决策		空间决策	
	低计算难度任务	高计算难度任务	低计算难度任务	高计算难度任务	低计算难度任务	高计算难度任务
第一对	A: (6,000 元, 45%) B:(3,000 元, 90%)	A: (9,500 元, 65%) B: (6,500 元, 95%)	A: (6,000 元, 20 年) B: (3,000 元, 10 年)	A: (9,500 元, 30 年) B: (6,500 元,10 年)	A: (6,000 元, 1,800 公里) B: (3,000 元, 900 公里)	A: (9,500 元, 600 公里) B: (6,500 元, 200 公里)
第二对	C: (6,000 元, 0.1%) D: (3,000 元, 0.2%)	C: (9,500 元, 0.65%) D: (6,500 元, 0.85%)	C: (6,000 元, 20 天) D: (3,000 元, 10 天)	C: (9,500 元, 30 天) D: (6,500 元, 10 天)	C: (6,000 元, 4 公里) D: (3,000 元, 2 公里)	C: (9,500 元, 3 公里) D: (6,500 元, 1 公里)
第三对	C: (6,000 元, 36%) D: (3,000 元, 72%)	C: (9,500 元, 58%) D: (6,500 元, 85%)	C: (6,000 元, 16 年) D: (3,000 元, 8 年)	C: (9,500 元, 27 年) D: (6,500 元, 9 年)	C: (6,000 元, 1,440 公里) D: (3,000 元, 720 公里)	C: (9,500 元, 540 公里) D: (6,500 元, 180 公里)